

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**KORELACE PARAMETRŮ ZÍSKANÝCH METODOU SMALL  
PUNCH TEST A KONVENČNÍCH MECHANICKÝCH  
VLASTNOSTÍ U NEŽELEZNÝCH KOVŮ**

CORRELATION OF THE SMALL PUNCH TEST PARAMETERS WITH  
CONVENTIONAL MECHANICAL PROPERTIES OF NONFERROUS ALLOYS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Pavel Papež

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

BRNO 2019

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Pavel Papež**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Josef Zapletal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Korelace parametrů získaných metodou Small Punch Test a konvenčních mechanických vlastností u neželezných kovů**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se bude zabývat rešeršní činností a experimentem moderních materiálů z lehkých slitin z hlediska popisu metody Small punch test, rozdělení metody, analýzy výsledných charakteristik a jejich případná korelace s konvenčními mechanickými vlastnostmi u litých a tvářených neželezných slitin s důrazem na určení vlivu anizotropie na možnost nalezení vztahů mechanických parametrů jednotlivých metod.

#### **Cíle bakalářské práce:**

1. Popis metodiky Small punch test, rozdělení.
2. Rešerše možných metod korelace se základními mechanickými charakteristikami u konstrukčních materiálů.
3. Experimentální stanovení parametrů SPT a korelace parametrů na vybrané neželezné slitině.

#### **Seznam doporučené literatury:**

DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K. a TROJANOVÁ, Z. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004.

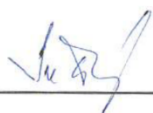
AVEDESIAN, M. M. ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys. USA, 1999.

LUCAS, G. E. The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials, 1983.

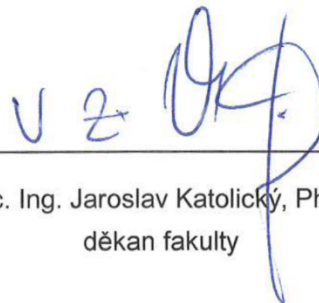
MATOCHA, K. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. VŠB, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 29. 10. 2018



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářské práce se zabývá popisem metody zkoušení materiálu penetračními zkouškami typu Small punch test. Jsou popsány její výhody a nevýhody, metody odběru vzorků, různé typy provedení a mechanismy uplatňující se při průběhu. Dále se práce zabývá způsoby korelace získaných parametrů s konvenčními zkouškami mechanických vlastností, a to základních mechanických vlastností, lomových a creepových.

Závěrem práce je experiment na slitině EN AW 2024, kde byla provedena korelace s tahovou zkouškou a popsána asymetrie vlastností v různém směru odběru ze základního materiálu.

### **Klíčová slova**

Small punch test, korelace mechanických vlastností, hliníková slitina EN AW 2024

## **Abstract**

Bachelor's thesis is focused on description of the penetration techniques called Small punch test, it's advantages and disadvantages, sample removal techniques, different types of construction and mechanisms appearing in it's process. Further the thesis describes different methods of correlation of acquired parameters to classical testing methods, with focus on basic mechanical properties, fractographic and creep properties.

At the end is an experimental part on aluminium alloy EN AW 2024. The experiment consisted of correlation to tensile test and shows asymetry of mechanical properties in different directions of material.

### **Keywords**

Small punch test, correlation of mechanical properties, Aluminium alloy EN AW 2024

#### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PAPEŽ, Pavel. *Korelace parametrů získaných metodou Small Punch Test a konvenčních mechanických vlastností u neželezných kovů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117728>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Josef Zapletal.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Korelace parametrů získaných metodou Small Punch Test a konvenčních mechanických vlastností u neželezných kovů“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne: 24.5.2019

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Josefovi Zapletalovi, Ph.D. za odborné rady a vedení při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval dalším svým blízkým za podporu během studia.

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce.....	2
3	Princip metody Small punch test.....	3
4	Rozdělení zkoušek.....	4
4.1	Rozdělení podle způsobu upnutí vzorku: .....	4
4.2	Rozdělení podle tvaru razníku .....	4
4.2.1	Ball punch test .....	4
4.2.2	Shear punch test .....	7
4.2.3	Disc bend test .....	8
4.3	Rozdělení podle kontrolovaného parametru .....	9
4.3.1	Konstantní rychlost posuvu .....	9
4.3.2	Konstantní zatížení .....	9
4.3.3	Konstantní deformace .....	9
4.4	Small punch creep test .....	9
5	Vzorky .....	10
5.1	Odběr .....	10
5.1.1	Mechanické odbrušování.....	10
5.1.2	Elektrojiskrový odběr .....	11
5.2	Úprava vzorku .....	12
5.3	Rozdělení podle tvaru .....	12
6	Vyhodnocování a korelace vlastností.....	13
6.1	Korelace mechanických vlastností a fraktografie.....	13
6.1.1	Vyhodnocení meze kluzu $R_e/R_{p0.2}$ .....	13
6.1.2	Vyhodnocení meze pevnosti $R_m$ a výpočet maximálního zatížení a prodloužení 16	
6.1.3	Korelace se zkouškou Charpyho kladivem a zjištění tranzitní teploty .....	17
6.2	Vyhodnocování creepových vlastností .....	21
7	Konvenční testování miniaturních vzorků .....	23
8	Experimentální část .....	25
8.1	Testovaný materiál .....	25
8.2	Metalografie.....	26
8.3	Tahové zkoušky .....	28
8.4	Popis experimentu .....	29
8.5	Zjištění hodnoty $F_e$ a $F_m$ .....	31
9	Výsledky a diskuse.....	39



9.1	Korelace $R_e$ .....	39
9.2	Korelace $R_m$ .....	41
9.3	Fraktografie .....	44
10	Závěr.....	46
11	Literatura .....	47
12	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	52
13	Seznam obrázků .....	54
14	Seznam tabulek .....	55
15	Seznam grafů.....	55
16	Seznam příloh.....	55

# 1 Úvod

Bezpečnost zařízení se jejich dlouhodobým používáním vlivem degračních procesů může výrazně snížit oproti jejich původnímu konstrukčnímu návrhu. Vyhodnocení zbytkové životnosti či snaha o prodloužení jejich životnosti vyžaduje znalost několika mechanických vlastností a jejich změny od původního materiálu. Konvenční metody získávání těchto informací však vedou k odstávkám zařízení a jeho značnému poškození či zkreslení vlastností odběrem vzorku a následnou opravou, nejčastěji prováděnou svařováním. Toto je jen zhoršeno u vyhodnocování lokalizovaných oblastí jako například povlaky, či svary a jejich TOO. Pro vyhodnocení životnosti je však dobré vědět i stav mechanických vlastností až vyrobené součásti, protože některé degrační procesy se mohou uplatnit již při její výrobě či montáži, a tím pádem by porovnání s původním materiálovým listem či zkušebním protokolem z polotovaru bylo zkreslené. Proto bylo nutno najít metodu, která by byla schopna zjistit mechanické vlastnosti, a přitom minimalizovat množství odebraného materiálu na součásti a tím pádem ji i zanechat v provozuschopném stavu bez potřeby oprav s minimálním ovlivněním vlastností. Small punch test je právě metodou vyvinutou pro tento účel. Vývoj započal v 80. letech v Japonsku a USA s hlavním zaměřením na zjištění radiačního zkřehnutí a ovlivnění vlastností zařízení v jaderných elektrárnách. Jejím rozvojem si dále metoda našla uplatnění například v medicíně pro zkoušení biomateriálů používaných v různých implantátech. Prozatím však neexistuje pro metodu mezinárodní norma, pouze Japonská pro testování materiálu z jaderných elektráren, ASTM pro zkoušení biomateriálů a návrh normy v podobě CEN Workshop Agreement 15627 pro zkoušení kovových materiálů.

## **2 Cíle práce**

1. Popis metodiky Small punch test, rozdělení.
2. Rešerše možných metod korelace se základními mechanickými charakteristikami u konstrukčních materiálů.
3. Experimentální stanovení parametrů SPT a korelace parametrů na vybrané neželezné slitině.

### 3 Princip metody Small punch test

Princip metody je v protlačování razníku přes zkušební těleso o tloušťce menší než 0,6 mm do jeho porušení. Zkušební těleso je upevněno mezi horní a dolní přítlačnou maticí. Výsledná data sledovaná v průběhu testu jsou závislosti zatížení a posunutí razníku, zatížení a průhyb vzorku nebo zatížení a ztenčení vzorku v místě působení razníku, toto znamená, že ze záznamu nedochází k přímému zisku hodnot mechanických vlastností jako např. u tahové zkoušky, ale je nutný přepočítání k získání. Projevuje se zde navíc víceosá napjatost místo jednoosé, jaká je u tahové zkoušky. Pro test platí tedy tento tenzor napětí:

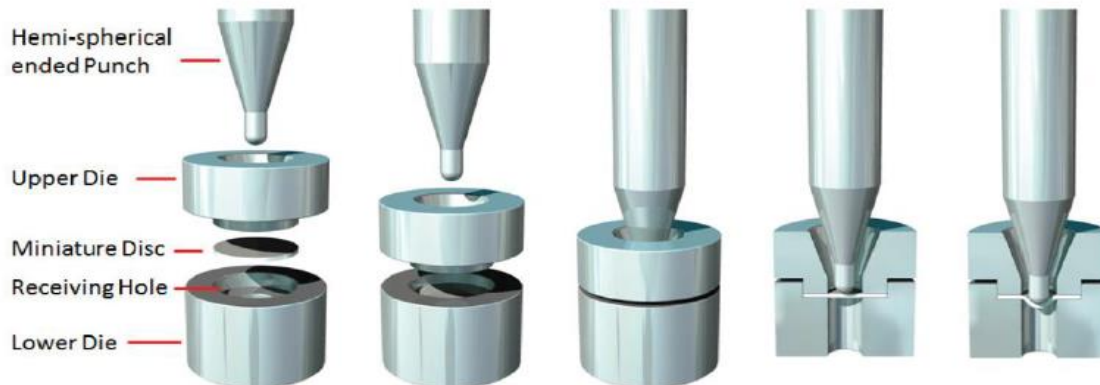
$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_{ij}^{el} + \frac{\nu}{1-2\mu} \varepsilon_{kk}^{el} \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

kde	E	Modul pružnosti v tahu
	$\mu$	Poissonova konstanta
	$\varepsilon$	Deformace elastická
	$\delta_{ij}$	Kroneckerovo delta

Vzhledem k lineárně plastickému chování materiálu je pak deformační tenzor definován jako:

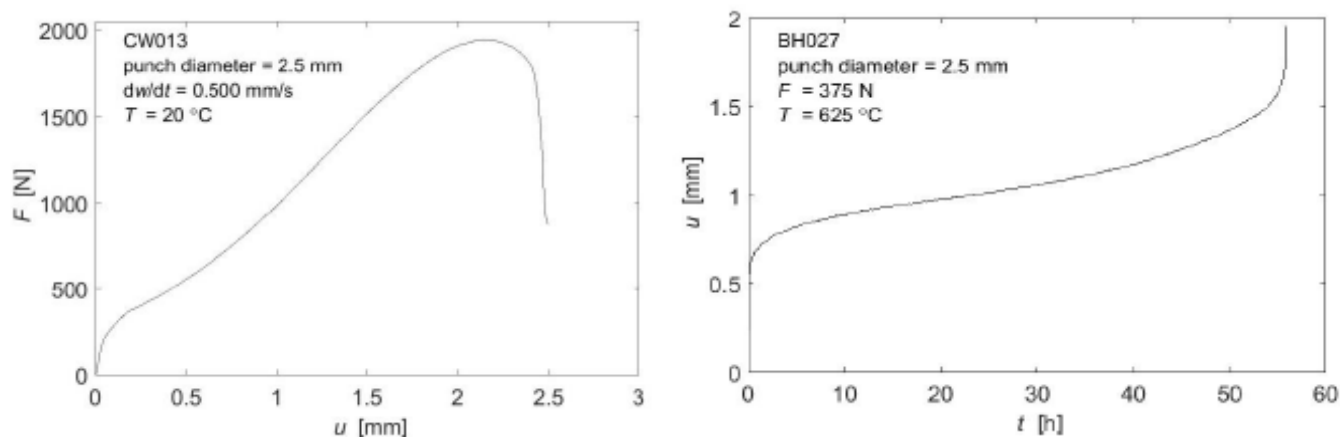
$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \quad (2)$$

Kde	$\varepsilon^{el}$	Elastická deformace
	$\varepsilon^{pl}$	Plastická deformace



Obr. 1 Schéma SPT

Hlavními ovlivňujícími prvky ovlivňující výsledky a průběh testu jsou teplota, tloušťka vzorku, velikost razníku a rozměry vzorku. Teplota ovlivňuje stejným způsobem jako jiné zkušební metody. Tloušťka vzorku způsobí pro stejný materiál posun záznamu k vyšším zatížením a možným i vyšším konečným deformacím vzorku. Velikost razníku ovlivňuje úhel mezi působící silou a povrchem vzorku, viz rovnice 3, to způsobuje ovlivnění výsledného napětí působícího na deformovaný vzorek. Čím vyšší bude nepřesnost výroby kuličky, tím větší bude nesouměrnost napětí působícího na vzorek, což může způsobit vyšší odchylky od hodnot  $R_e$  a  $R_m$  při konečném přepočtu.



Obr. 2 Typické průběhy, vlevo SPT, vpravo creep test

## 4 Rozdělení zkoušek

Zkoušky je možno dělit dle několika různých parametrů. Nejpoužívanějším je pravděpodobně časová závislost testu, tzn. která veličina je řízená. Ta přímo ovlivňuje, jaké vlastnosti materiálu jsou získávány a s kterou konvenční zkouškou se výsledky korelují. Dalším důležitým rozdělením je dle tvaru razníku, který ovlivňuje projev některých mechanismů probíhajících při testu. Klasicky lze zkoušky rozdělit i dle teploty, při které probíhají. Posledním rozdělením je uložení vzorku v matici, které je spíše konstrukčním hlediskem, a ovlivňuje pouze mírně projev některých mechanismů při testu.

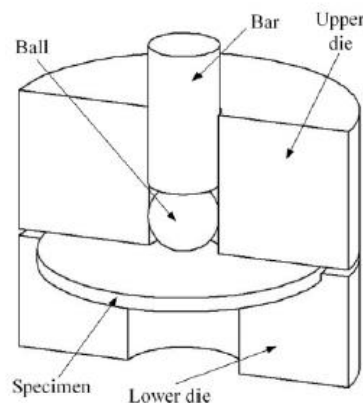
### 4.1 Rozdělení podle způsobu upnutí vzorku:

- Bulge punch test – Vzorek je pevně uchycen mezi horní a dolní části matice po celou dobu testu. Použití u většiny zkoušek, umožňuje větší rozměry vzorku a dává větší stabilitu průběhu celého procesu. Podmínka sevření alespoň třetiny povrchu vzorku.
- Punch drawing test – Vzorek je pouze volně položen na dolní matici. Výhradně pro zkoušku ohybovou.

### 4.2 Rozdělení podle tvaru razníku

#### 4.2.1 Ball punch test

Nejběžnější SPT pro zjištění mechanických vlastností jako  $R_m$ ,  $R_e$  a creepových vlastností materiálu. Používá se pro nízké, pokojové i zvýšené teploty. Konstrukčně se nejčastěji jedná o Bulge punch test. Razník je zakončen hemisférickou plochou nebo je pod ním umístěna kulička. Vzorek pro tento test je umístěný mezi horní a spodní opěrnou maticí a je protlačován až do porušení. Vzorky by dle CWA 15627 měly mít průměr 8 mm a tloušťku 0,5 mm, avšak mohou být použity i menší, tzn. průměr 3 mm a tloušťka 0,25 mm.



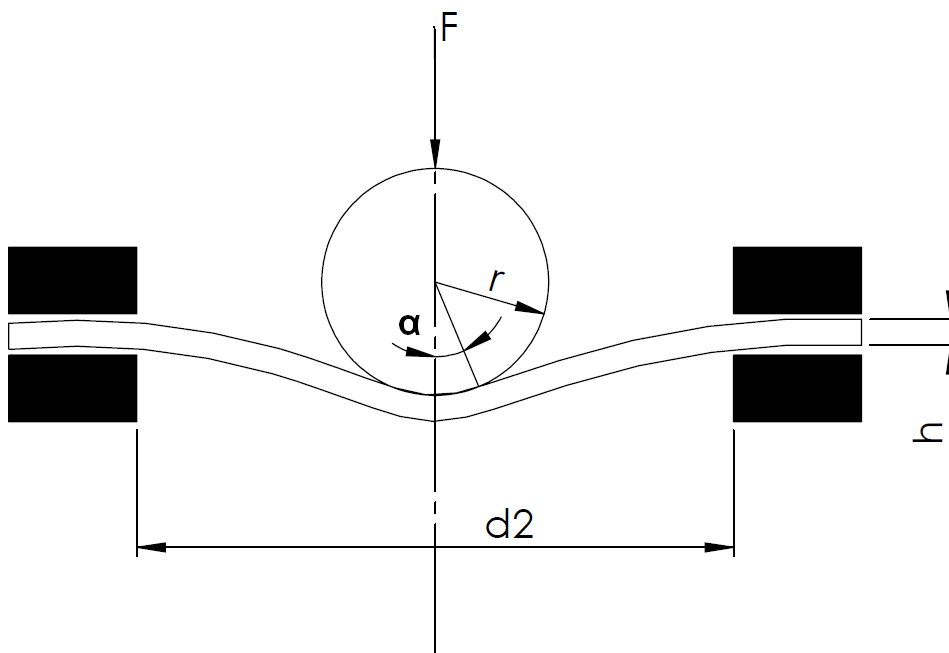
Obr. 3 Schéma Ball punch test

S menším vzorkem ještě není mnoho zkušeností, a proto je doporučován spíše vzorek větší. Zakončení razníku, popřípadě kulička, by měla mít poloměr o velikosti  $r=1,25$  mm, kde pro creepové testy je dovolen rozsah poloměru  $r$  od 1 mm do 1,25 mm. Zatěžování probíhá stálou rychlostí pohybu razníku, a to dle materiálu v rozmezí 0,2 – 2 mm/min. Z výsledné deformace vzorku je možno pod elektronovým mikroskopem prozkoumat lomovou plochu, typ lomu a procesy uplatňující se při jeho poškození nebo degradaci v průběhu provozu. Preferuje se hemisférické zakončení razníku k minimalizaci vlivu nepřesnosti kulatosti kuličky.

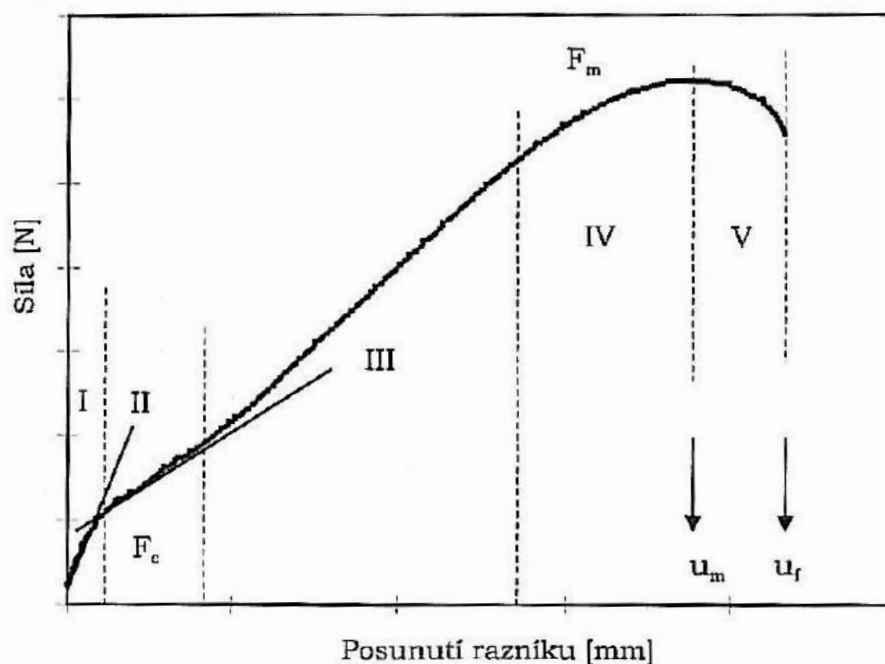
Výpočet napětí působícího při kuličkovém testu v závislosti na velikosti razníku:

$$\sigma = \frac{k * F}{\alpha * r * h} \quad (3)$$

kde	k	konstanta
	F	působící síla
	r	poloměr razníku/kuličky
	h	počáteční tloušťka vzorku
	$\alpha$	úhel styku kuličky s vzorkem



*Obr. 4 Schéma pro výpočet napětí při Ball punch testu*



Obr. 5 Schéma oblastí při Ball punch testu

Průběh tohoto testu se dá rozdělit na 5 oblastí, podobně jako u tahové zkoušky, dle probíhajících mechanismů, jak je vidět na Obr. 5

Oblast I vykazuje vysoké počáteční kontaktní napětí a tím způsobenou mikro-plastickou deformaci zkušebního tělesa. Obdobně jako u tahové zkoušky, je zde převážná část deformace elastická a po odtížení by neměla zůstat žádná trvalá deformace, tím pádem čím vyšší má materiál mez kluzu tím širší je tato oblast.

Oblast II začátek plastické deformace začínající se šířit přes tloušťku zkušební vzorku a následně v radiálním směru. Dochází k plastickému ohybu, způsobenému poklesem rychlosti zatěžování průběžnou změnou úhlu styku penetrující kuličky s deformujícím se vzorkem, jak je patrné z rovnice (3). Tato změna úhlu je navíc ovlivňována přesností vyrobené kuličky, kde může být v každém směru jiná nepřesnost a tím způsobené ovlivnění úhlu a výsledné deformace. Počátek této oblasti závisí na původní tloušťce vzorku.

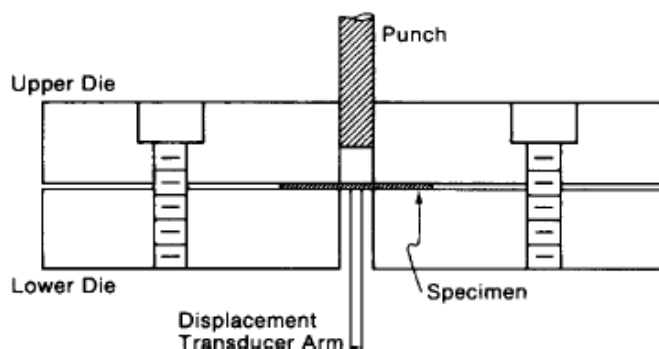
Oblast III je velmi závislá na zpevnění materiálu. Plastický ohyb zde postupně přechází v protahování. Posuv k vyšším zatížením a menšímu posunutí s rostoucím poloměrem kuličky a klesajícím průměrem otvoru v dolní matici.

Oblast IV deformací vzniká na vzorečku hrdlo, obdobně jako tvorba krčku u tahové zkoušky. Následkem vzniku hrdla je i snížení závislosti zatížení – posunutí razníku. Konec této oblasti se značí jako maximální síla  $F_m$  a slouží následně pro výpočet  $R_m$ .

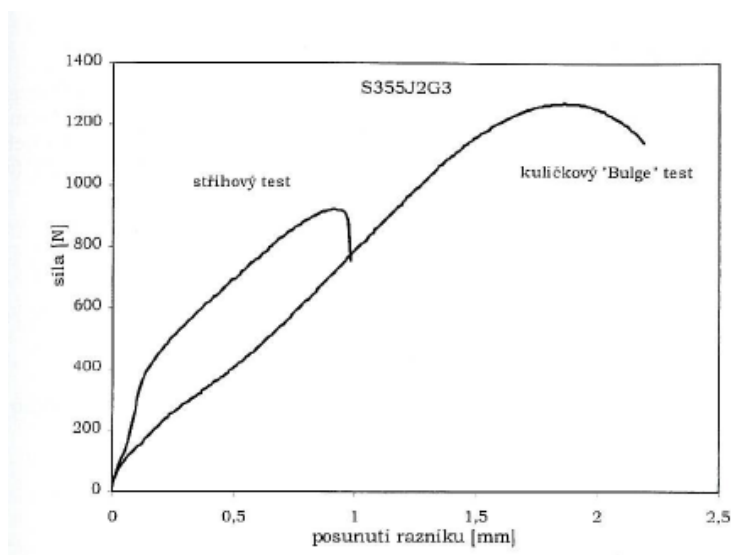
Oblast V začíná se iniciovat trhlinka na vzorečku. Dvojosá napjatost způsobí růst trhlinky buď na vrcholu vzniklého vrchlíku a po obvodu zkušební vzorku nebo jen na vrcholu vrchlíku. Vlivem růstu trhlinky se také snižuje zatížení.

#### 4.2.2 Shear punch test

U stříhového penetračního testu je vždy konstrukční provedení typu bulge punch test. Razník je zde ostrohranný kruhový, což způsobuje deformace pouze v oblasti vůle mezi razníkem a matricí, což minimalizuje vliv membránového efektu.



Obr. 6 Schéma Shear punch testu

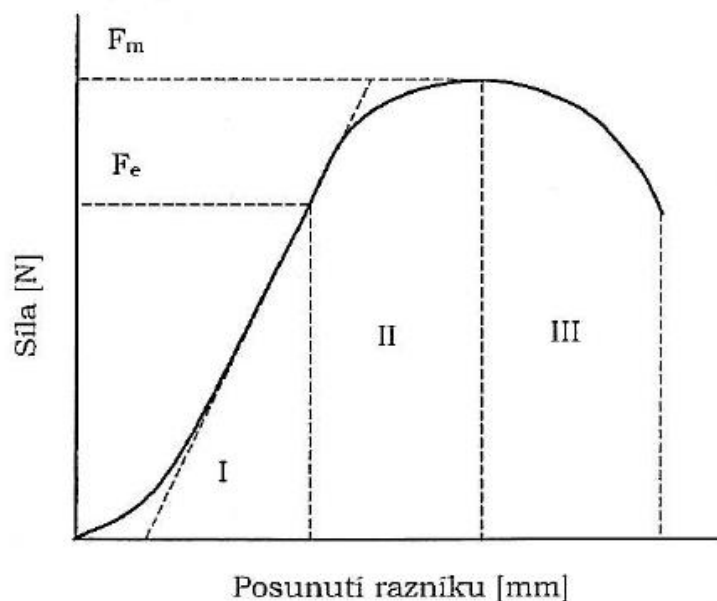


Obr. 7 Porovnání Shear a Ball punch testu

Změřená závislost je velmi podobná té získané konvenční tahovou zkouškou. Oproti kuličkovému testu je zde mnohem výraznější nárůst zatížení na hodnotu  $F_e$  viz. Obr. 7. Právě díky této vlastnosti se tato metoda používá pro zjištění mechanických vlastností a zpevňování při napětí u jemnozrnných superplastických materiálů a výrobků vytvářených technologiemi s vysokými hodnotami vnesené plastické deformace. Metoda se však používá i na testování nanokrystalických materiálů, pro které by byla výroba klasického vzorku pro tahovou zkoušku náročná, drahá nebo nemožná. Obzvláště v poslední době se zaměření této metody orientuje na zkoušení při vysokých teplotách, kde je oproti konvenčním velká časová a materiálová úspora a mnohem jednodušší zkoušení.

Výsledný záznam lze rozdělit dle mechanismů, které se projevují, do 3 oblastí, viz Obr. 8, velmi podobných záznamu ze zkoušky tahem.





Obr. 8 Schéma průběhu Shear punch testu

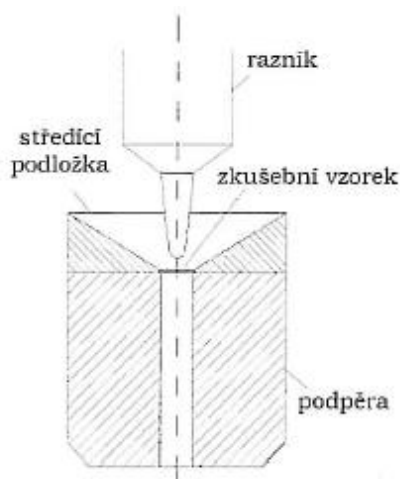
Oblast I vykazuje pouze elastickou deformaci. Končí na hodnotě  $F_e$ , ze které se následně přepočítává hodnota  $R_e$ . Nástup zatížení se může lišit dle tvrdosti materiálu, u měkčích je okamžitě lineární, zatímco u tvrdších vytváří exponenciální křivku.

Oblast II je specifická plastickou deformací vyvolanou stříhovým mechanismem až do počátku porušování vzorku. To nastává hlavně na obvodu vzniklého vrchlíku při maximálním zatížení  $F_m$ .

Oblast III vykazuje šíření trhliny po obvodu a dolom vzorku při poklesu zatížení.

#### 4.2.3 Disc bend test

Metoda, při které dochází k protlačování vzorku kuželovým razníkem. Konstrukční provedení testu je punch drawing. Uplatňuje se ke zjišťování mechanických vlastností a dle [34] i ke zjišťování ekvivalentu tvorby krčku ze zkoušky tahem při SPT, který zde není na maximální hodnotě síly, ale v oblasti před ní. Kumar a kol. [34] ve své práci publikují hodnotu tvorby krčku při 0,48 mm průhybu vzorku pro původní tloušťky vzorku 0,25 mm u materiálů s rozdílnými vlastnostmi a při různých teplotách. Záznam zkoušky je velmi podobný záznamu z Ball punch testu.



Obr. 9 Schéma Disc bend test

## **4.3 Rozdělení podle kontrolovaného parametru**

### **4.3.1 Konstantní rychlost posuvu**

Časově nezávislé zkoušky, definována konstantní rychlost posuvu razníku po celou dobu zkoušky. Záznam je závislost síla – průhyb vzorku, nebo síla – posunutí razníku. Korelace s konvenční zkouškou tahem. Rozsah teplot je od kryogenních po vysoké teploty.

### **4.3.2 Konstantní zatížení**

Časově závislá zkouška. Konstantní síla působící na vzorek po celou dobu zkoušení při zvýšené teplotě. Záznamem je závislost průhyb vzorku – čas. Analogie s konvenční creepovou zkouškou. Může být doplněn argonovou inertní atmosférou k zabránění oxidaci vzorku při průběhu testu. Zařízení musí být upraveno, aby vydrželo vysoké teploty, tzn. matice a razník jsou vyrobeny z niklových superslitin.

### **4.3.3 Konstantní deformace**

Analogie s relaxační tahovou zkouškou. Sledovanými parametry zde je zatěžovací síla a čas. Dochází k nastavení stálého výchozího napětí na vzorku za vysoké teploty. Vlivem teploty dochází za určitý časový úsek k relaxaci výchozího napětí na napětí zbytkové za vymizení elastické deformace na úkor růstu plastické deformace. Tím dochází k zachování konstantní deformace vzorku. Zkouška je ukončena, když hodnota zatěžující síly přestane klesat vlivem relaxace.

## **4.4 Small punch creep test**

Creepovému zkoušení se věnuje část A návrhu normy CWA 15627. Rozsah povolených teplot dle návrhu je od 20 do 1100 °C. Měření hodnot během testu probíhá na vzorku pomocí extenzometrů a tenzometrů, k tomu se přidává hodnota posunutí razníku. Právě rozdíl mezi posunutím razníku a odchylkou umístění vzorku udává jeho ztenčení při testu. Navíc je možno provádět i přerušované testy k určení iniciace a růstu trhliny, avšak není to doporučeno vzhledem k problematice znovuvložení vzorku a ovlivnění zbytku testu. Je možno sledovat iniciaci trhliny a její růst. Vhodnější jsou průběžné metody sledování jako třeba akustická emise nebo měření změny elektrického potenciálu vzorku.

Je doporučeno provádět creepové zkoušky v ochranné inertní atmosféře k prevenci oxidace nebo koroze vzorku. Avšak pokud se zkoumá vzorek pro zjištění vhodnosti materiálu pro použití, je možno použít atmosféru přítomnou při provozu, vždy je však nutno přesně znát složení atmosféry. Ihned po naplnění atmosférou je nutno provést co nejrychlejší ohřev na požadovanou teplotu testu, a po jejím dosažení co nejrychleji aplikovat zatížení.

Vzorky jsou doporučeny kruhové o průměru 8 mm a s tloušťkou 0,5 mm, ale jsou dovoleny i větší rozměry, například z důvodu rozměrů zrna nebo výšky povlaku.

## 5 Vzorky

### 5.1 Odběr

Hlavní přednost metody. Odběr je nedestruktivní, tzn. nemá vliv na provozuschopnost součásti a vnáší buď žádná nebo minimální napětí ovlivňující okolí. Odběr se provádí přímo na místě pomocí speciálních odběrových hlav typu SSam, které se připínají na povrch, proto požadavek jisté relativní rovnosti povrchu. Je možné odebírat jak z povrchu součásti, tak například i z vnitřních ploch potrubí.

Dělení dle principu oddělení vzorku od základního materiálu na:

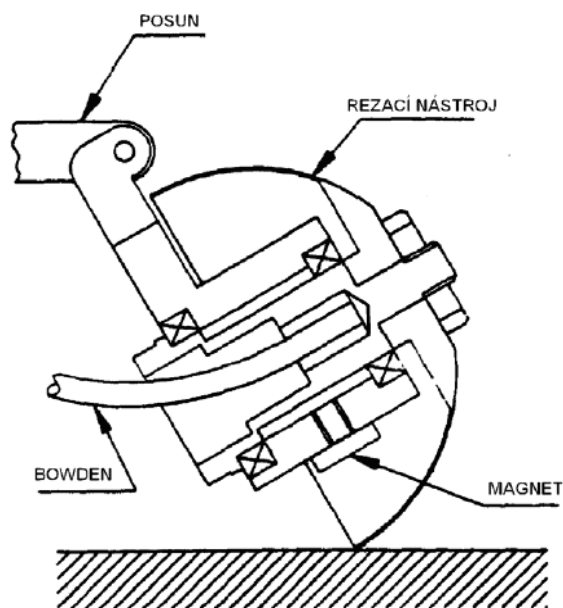
- a. Mechanické odbrušování
- b. Elektrojiskrový odběr

#### 5.1.1 Mechanické odbrušování

Odbrušování vrstvy materiálu, mezi vznikajícím vzorkem a tělesem, dutým nástrojem ve tvaru polokoule, který pomalu vniká do materiálu po kruhové dráze při velmi vysokých otáčkách nástroje, viz Obr. 11. Směr posuvu nástroje je kolmý k jeho ose. Nástroj je většinou vyrobený z oceli s povrchovou vrstvičkou kubického nitridu boru CBN. Nástroj je vybaven i chladícím ustrojem, jehož použití se liší dle materiálu, u některých není nutné a vzorek není tepelně znehodnocen i bez chlazení, ale není to nejvhodnější řešení. S chlazením je možno použít vyšší řezné rychlosti. Odebrané těleso má pak tvar „lodičky“ nebo kulového vrchlíku, a to v závislosti na konstrukčním provedení odběrové hlavy. Odebrané tělesa mají obě tloušťky cca 4 mm a průměr/šířku kolem 25 mm. Z takto odebraného materiálu je pak možno vytvořit až 4 zkušební vzorky pro SPT o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm.



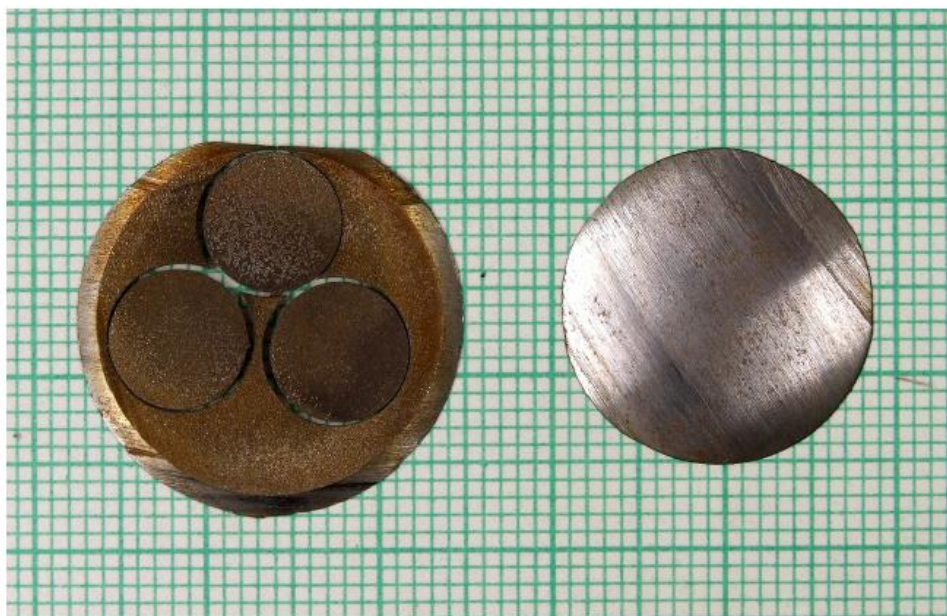
*Obr. 10 Odběrová hlava*



*Obr. 11 Schéma mechanického odbrušování*

### 5.1.2 Elektrojiskrový odběr

Odběr na principu selektivního odtavování částic materiálu krátkými periodicky opakovanými elektrickými impulzy. Elektrony z paprsku na povrchu svou mechanickou energií vyvolají tlak a teplo dostatečné k natavení a oddělení částice, a jejímu následnému odplavení.



*Obr. 12 Materiál odebraný elektrojiskrovou metodou*

Výboj vznikne v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole. Impulzy jsou vyvolány dvěma elektrodami umístěnými od sebe ve vzdálenosti jiskrové mezery o velikosti 0,01 mm až 0,5 mm, přičemž obrobek je napojen na anodu a nástroj na katodu. Elektrody jsou ze speciálních slitin a ve tvaru části kruhu. Umožňuje odběr materiálu s minimálním vlastním pnutím v místě při odběru. Odebraný materiál může mít tloušťku až 6 mm a délku 30 mm.

## 5.2 Úprava vzorku

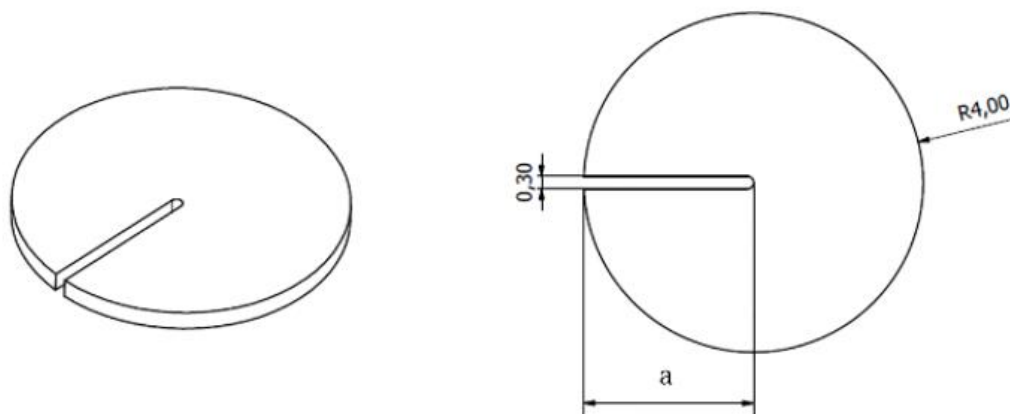
K vytvoření tvaru vzorku z původního odřezaného materiálu se používá opět elektrojiskrové automatizované metody do tlouštěk přibližně o 10% vyšší než požadované. Následované leštěním papírem s velikostí abrazivních částic nejdříve P320 následované dokončením s velikostí P1200 na požadovanou tloušťku s tolerancí 1% tloušťky.

## 5.3 Rozdělení podle tvaru

Tvar vzorku určuje, podobně jako provedení zkoušky, s kterou konvenční zkouškou se budou výsledky korelovat. Nejobvyklejší a zároveň nejuniverzálnější jsou kruhové vzorky, které se používají pro zjištění mechanických a creepových vlastností. Tyto vzorky mají nejčastěji průměr 8 mm a tloušťku 0,5 mm, s tím že je možno upravit rozměry dle potřeby, například ze strukturních důvodů. Při úpravě je nutno počítat s rozdílnými koeficienty při vyhodnocování, protože velikost vzorku je jeden z nejvíce ovlivňujících faktorů testu. Pro fraktografické testy navrhuje stávající vypracování normy [6] 8 mm vzorky s vybráním, viz. Obr. 13.

Dále se používají i vzorky se čtvercovým průřezem se zaměřením na fraktografii a zjištění tranzitní teploty. Tyto vzorky mají nejčastěji rozměry 10 x 10 mm s tloušťkami 0,5 mm.

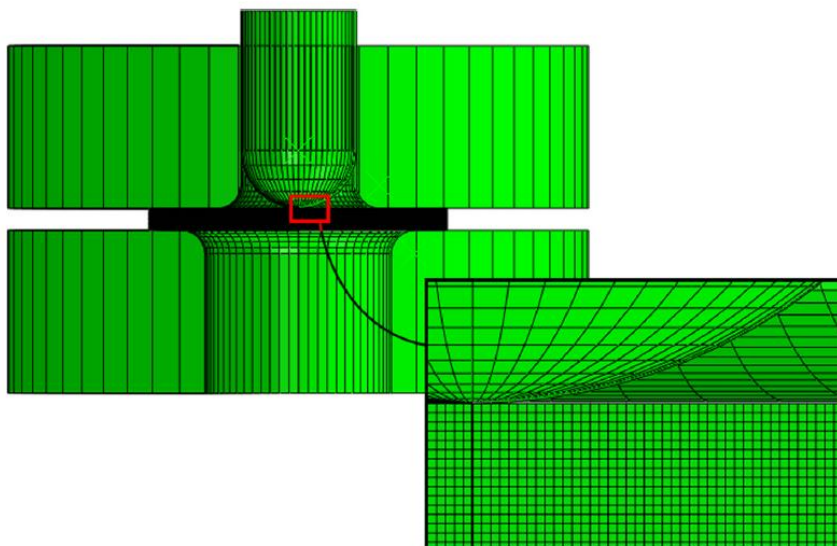
Jsou možné i speciální vzorky přímo simulující některé aplikace, například v práci [37], kde v kombinaci s metodou konečných prvků proběhlo zkoušení zakřivených vzorků simulující použití materiálu jako část potrubí.



*Obr. 13 Vzorky pro fraktografii*

## 6 Vyhodnocování a korelace vlastností

Vyhodnocení, nebo korelace s konvenčními zkouškami, je prováděno přepočtem získaných hodnot z testu. Často je využívána metoda konečných prvků a neurální síť. Druhou metodou je potom využití porovnávání získané křivky až do objevení trhliny, s databází křivek pro napětí – prodloužení, tato metoda využívá Rambergův-Osgoodův model pro popis napětí – prodloužení, s možnými úpravami pro zohlednění dvouosé napjatosti.



Obr. 14 Model pro metodu konečných prvků

### 6.1 Korelace mechanických vlastností a fraktografie

#### 6.1.1 Vyhodnocení meze kluzu $R_e/R_{p0,2}$

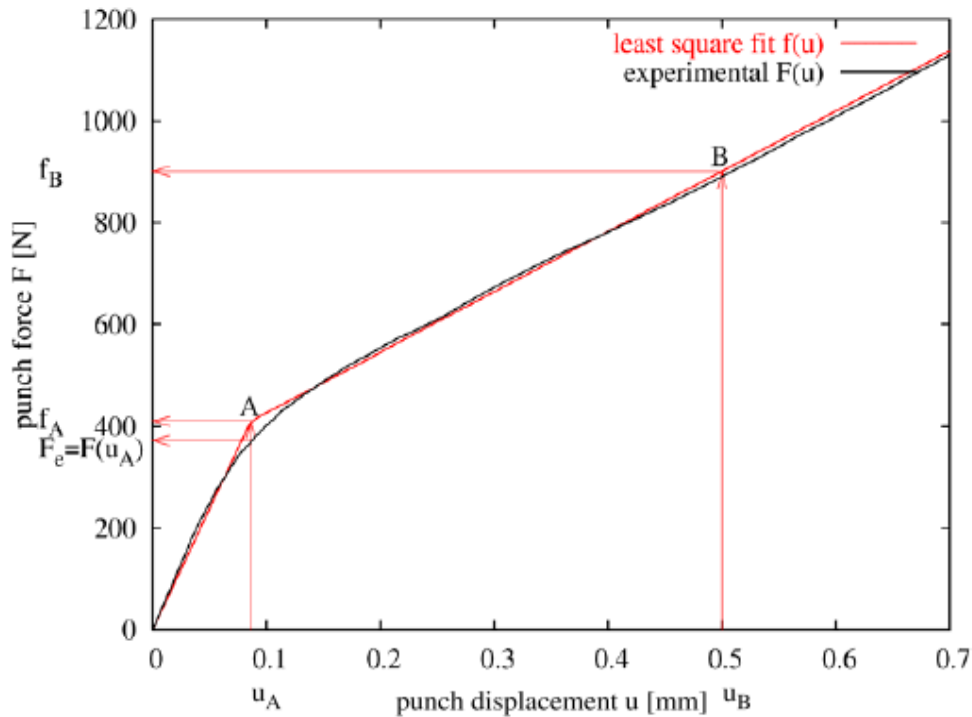
Probíhá ze záznamu zatížení a posunutí razníku dle návrhu normy CWA 15627. Nejprve je nutno vytvořit funkci aproximující průběh zatížení v elasticko-plastické oblasti. Funkce se vytvoří pomocí dvou bodů, bod A je dle CWA 15627 umístěn do protnutí prodloužení čistě plastické a čistě elastické části na křivce záznamu. Bod B je volitelný, návrh normy doporučuje hodnotu posunutí razníku  $u_B$  mezi 0,3 mm a 0,5 mm, vhodnou hodnotou je i původní tloušťka vzorku. Následné určení  $F_e$  je provedeno promítnutím hodnoty na protnutí v bodě A na záznamovou křivku, výpočtem funkční hodnoty na bodě  $u_A$ .

Funkce má dvě části, pro čistě elastickou část a pro elasticko plastickou část.

$$f(u) = \frac{f_A}{u_A} u ; \text{ pro } 0 \leq u < u_A \quad (4)$$

$$f(u) = \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A ; \text{ pro } u_A \leq u < u_B \quad (5)$$

kde	$f_A$	hodnota síly v bodě A
	$u_A$	hodnota posunutí razníku v bodě A
	$f_B$	hodnota síly v bodě B
	$u_B$	hodnota posunutí razníku v bodě B
	$u$	hodnota posunutí, pro kterou hledáme funkční hodnotu



Obr. 15 Aproximace  $F_e$  dle CWA

Určení parametrů  $f_B$ ,  $f_A$  a  $u_A$  probíhá pomocí funkce minimalizování chyb:

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (6)$$

Dle prozatímního novějšího rozpracování normy [6] se však uvažuje s hodnotou  $F_e$  v promítnutí dvou aproximačních přímk, tzn. v bodě  $f_A$ , viz. Obr. 16. Návrh normy to odůvodňuje zjištěním menšího rozptylu výsledků. Toto určení  $F_e$  je obdobné s návrhem publikovaným Mao a Takahashi v roce 1987. Dochází tím ke změně rovnice (5) na nový tvar, který navíc počítá s hodnotou  $v_0$ , což je parametr posunutí po překonání vlivu tvrdosti materiálu. Přidává to tedy třetí část funkce kdy platí:

$$f(v) = 0 ; \text{pro } 0 \leq v < v_0 \quad (7)$$

Nový tvar rovnice (4) vypadá následovně:

$$f(v) = \frac{f_A}{v_A - v_0} (v - v_0) ; \text{pro } v_0 \leq v < v_A \quad (8)$$

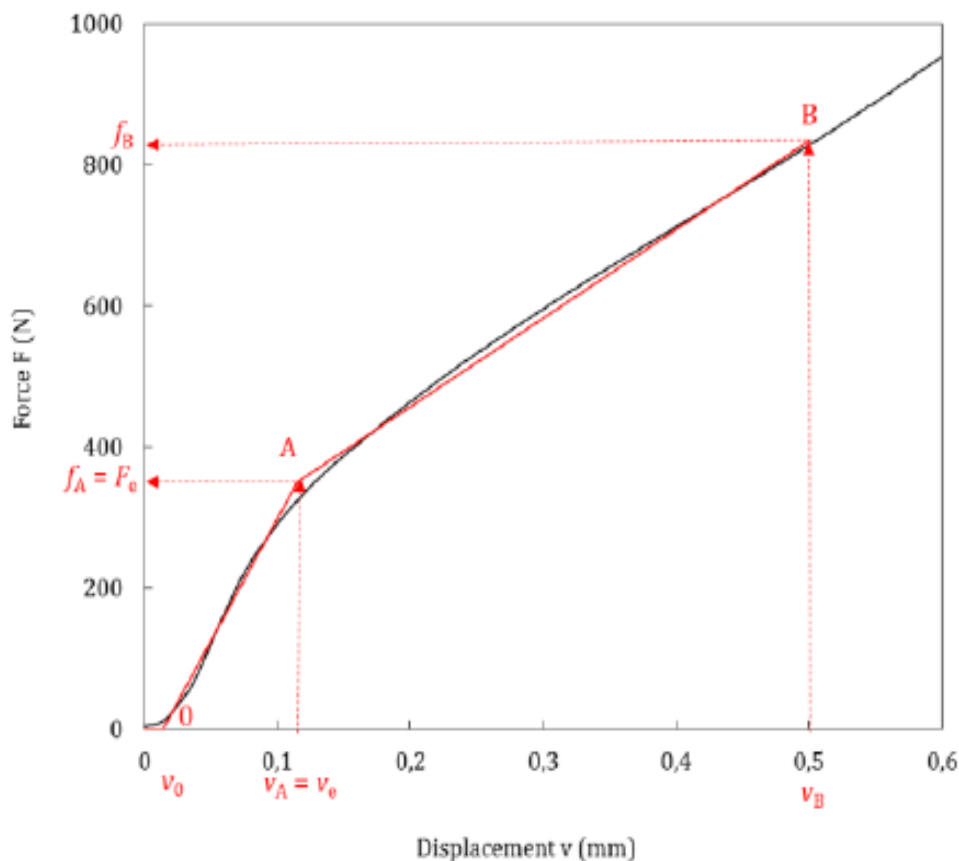
kde  $v_A$  hodnota posunutí razníku v bodě A  
 $v_0$  hodnota posunutí po překonání vlivu tvrdosti materiálu  
 $v$  hodnota posunutí razníku, pro kterou hledáme funkční hodnotu



Následné určení hodnoty meze kluzu  $R_e$  se provádí pomocí vztahu s koeficientem  $\beta$ , který závisí na geometrii zkušebního stroje a testovaném materiálu. Navíc existuje několik možných vztahů dle různých zdrojů. Podle CWA [7] i návrhu normy [6] se používá rovnice (8):

$$R_{p0,2} = \beta_{Rp0,2} \frac{F_e}{h_0^2} \quad (9)$$

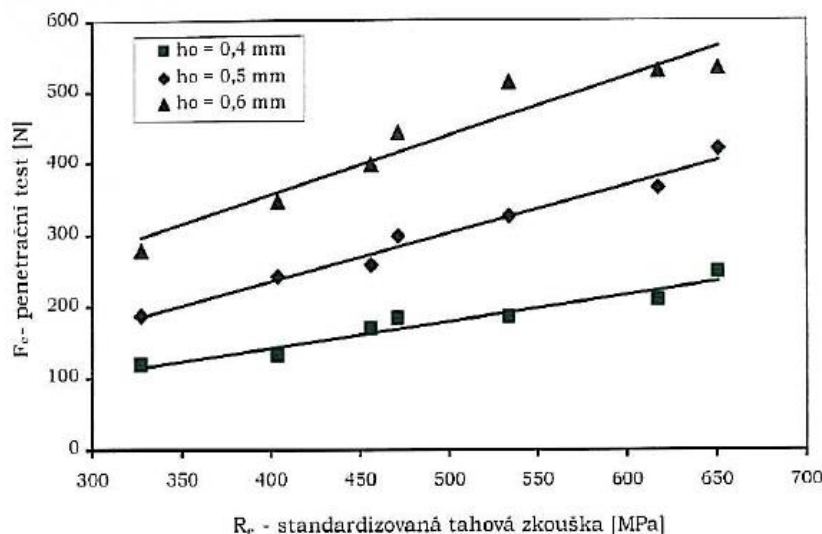
Kde  $F_e$  síla na přechodu plastické a elastické oblasti  
 $h_0$  původní tloušťka vzorku



*Obr. 16 Určení  $F_e$  dle rozpracovaného návrhu normy*

Zatím neexistuje žádný univerzální koeficient  $\beta_{Rp0,2}$ , ačkoli existují snahy o jeho zjištění. Podle Mao a Takahashi [16] může vycházet v intervalu od 0,32 do 0,45 v závislosti na materiálu. CWA má obdobný rozsah hodnot. Nejnovější návrh normy pro vzorky s průměrem 8 mm a materiály s mezí kluzu od 200 do 1000 MPa rozlišuje záznam F-v a F-u, resp. zatížení – průhyb vzorku a zatížení – posuv razníku. Tyto koeficienty jsou pak tedy 0,510 pro F(u) a 0,479 pro F(v).





Obr. 17 Závislost přesnosti korelace  $R_e$  na tloušťce vzorku

### 6.1.2 Vyhodnocení meze pevnosti $R_m$ a výpočet maximálního zatížení a prodloužení

Hodnota  $u_f$  je vyjádřena jako posunutí razníku při 20% poklesu zatížení od dosaženého maximálního zatížení, což značí vytvoření trhliny. Toto zatížení se dá korelovat se silou pro prasknutí a následným napětím pro prasknutí  $\sigma_f$ . Hodnota  $F_f$  je tedy stanovena Rovnicí (10).

$$F_f = 0,8 * F_m \quad (10)$$

Obdobně jako  $F_f$  je možné získat i hodnotu deformace po prasknutí vzorku  $\varepsilon_{\text{fracture}}$ . Zde je však nutno změřit tloušťku vzorku  $h_f$  v místě trhliny viz. Obr. 18, a tu pak vložit do rovnice (11):

$$\varepsilon_f = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right) \quad (11)$$

Pro korelaci  $R_m$  se používá vztah obdobný korelaci s mezí kluzu. Opět zde figuruje koeficient  $\beta$  uvažující geometrické parametry testu, tento vztah se dle práce [16] se ukázal jako nejuniverzálnější. Navíc snižuje ovlivnění  $F_m$  tloušťkou vzorku. CWA stejně jako návrh normy používá tento vztah:

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0 u_m} \quad (12)$$

Kde  $F_m$  maximální dosažená síla  
 $u_m$  prodloužení při dosažení maximální síly

Alternativně rozpracovaný návrh formy obsahuje druhý vztah, vycházející ze síly  $F_i$  na specifické pozici prodloužení  $u_i$  popřípadě posunutí  $v_i$ . Tyto dvě hodnoty byly určeny numericky a jsou z větší části nezávislé na materiálových vlastnostech projevujících se v tahu a dávají tak přesnější hodnoty než předchozí vztah. Alternativní rovnice má pak tento tvar:

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_i}{h_0^2} \quad (13)$$

Pro tento alternativní vztah má návrh normy uvedeny přímo hodnoty pro zjištění  $F_i$  tak i korelační parametry  $\beta_{Rm}$ . Jak je vidět v Tabulce 1 převzaté přímo z návrhu normy [6]

Tabulka 1 korelační parametry pro alternativní výpočtový vztah [6]

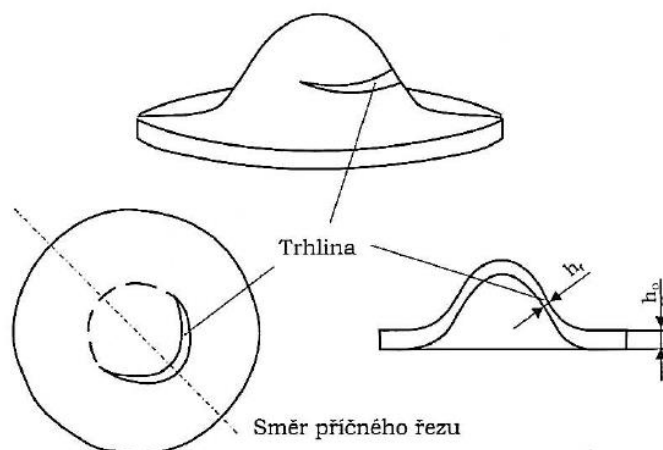
Geometry	$r$ (mm)	$D$ (mm)	Lower die edge type	$h_0$ (mm)	Curve type	$u_i   v_i$ (mm)	$\beta_{Rm}$
Standard	1.25	4.0	Chamfer 0.2 x 45°	0.5	$F(u)$	0.552 ( $u_i$ )	0.192
Standard	1.25	4.0	Chamfer 0.2 x 45°	0.5	$F(v)$	0.645 ( $v_i$ )	0.179
Miniature	0.5	1.75	Chamfer 0.2 x 45°	0.25	$F(u)$	0.282 ( $u_i$ )	0.205
Miniature	0.5	1.75	Chamfer 0.2 x 45°	0.25	$F(v)$	0.320 ( $v_i$ )	0.197

Jedny z prvních publikovaných vztahů [41] počítali u přepočtu meze kluzu i s lineárním členem  $\alpha$  jakožto další materiálovou konstantou, přičemž tyto vztahy se ukázali být dle [16] silně závislé na použitém materiálu, pro který dávají přesnější hodnoty než předchozí rovnice.

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0^2} + \alpha \quad (14)$$

Případně další modifikace:

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0} + \alpha \quad (15)$$



Obr. 18 Měření tloušťky po dokončení zkoušky

### 6.1.3 Korelace se zkouškou Charpyho kladivem a zjištění tranzitní teploty

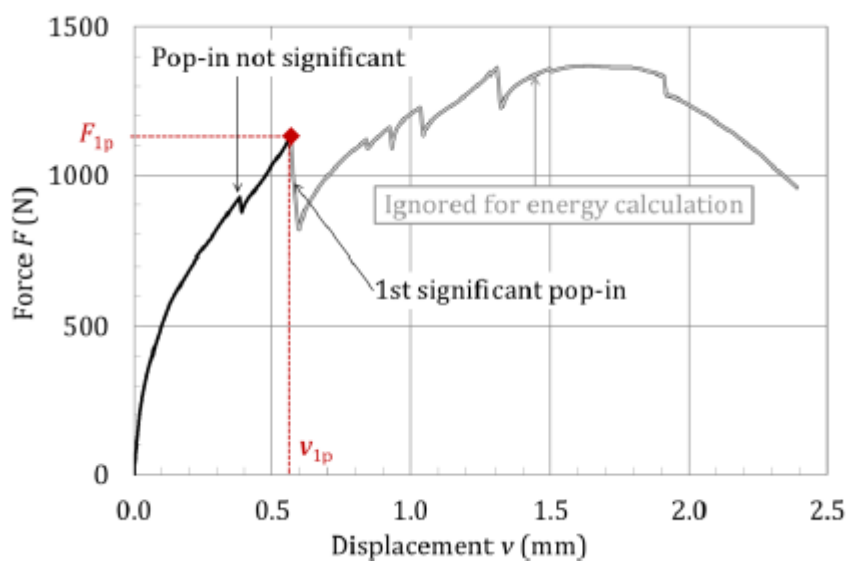
Na vyhodnocení a korelaci lomových vlastností existují tři postupy. Nejjednodušší je fraktografické prozkoumání vzorku v rastrovacím elektronovém mikroskopu a pozorování lomových ploch. Z pozorovaných ploch je následně možno určit mechanismus porušení dle druhu lomu. K lomu ve většině případů dochází v poslední oblasti testu, avšak při nízkých teplotách se může trhlina vytvořit již v oblasti plastického ohybu před výrazným projevem membránového efektu. Je nutno zastavit razník včas aby nedošlo k znehodnocení plochy.

Princip zjištění tranzitní teploty materiálu je podobný klasickému, tzn. test provedený pro několik vzorků při různých teplotách v rozsahu od kryogenních do vysokých. Pro zjištění tranzitní teploty je nutno znát energii spotřebovanou na vytvoření trhliny. Ta je integrálem křivky zatížení ze záznamu. Je zde menší rozdíl mezi CWA a rozpracovaným návrhem normy, kdy ve CWA je horní mezí integrálu hodnota  $u_f$ , tedy finální posunutí pro prasknutí, zatímco

v rozpracovaném návrhu normy se počítá s hodnotou horní meze  $u_m$ , tedy hodnotou na maximálním zatížení  $F_m$ .

$$E_{SPT} = \int_0^{u_f} F(u) du \quad (16)$$

V případě křehkého lomu může záznamová křivka vykazovat skoky zatížení, viz. Obr. 19, kdy dochází k praskání materiálu. Pokud je poškození rovno alespoň 10% maximální síly dosažené při testu, mění se horní integrační mez na hodnotu posunutí v okamžiku poškození tzv. pop-in jevu.



Obr. 19 Pop-in záznamu

Před samotným vyhodnocením tranzitní teploty z energie lomu je doporučeno zkorigovat hodnotu energie podle maximální síly  $F_m$ .

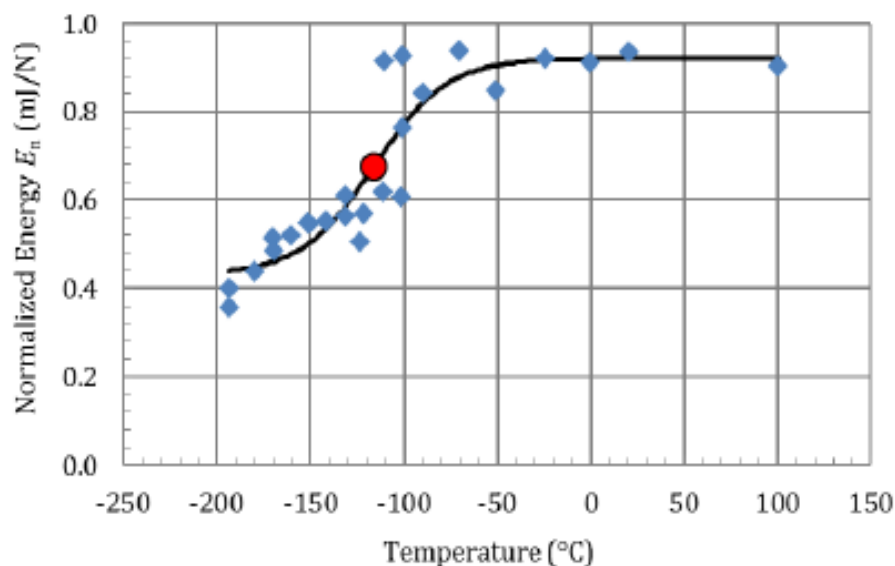
$$E_n = \frac{E_{SPT}}{F_m} \quad (17)$$

Poté je možno vyhodnotit tranzitní teplotu pomocí použití metody nejmenších čtverců:

$$E_n(T) = \frac{E_{US} + E_{LS}}{2} + \frac{E_{US} - E_{LS}}{2} \tanh\left(\frac{T - T_{SPT}}{C}\right) \quad (18)$$

Kde  $E_{US}$  nejvyšší dosažená zkorigovaná energie  
 $E_{LS}$  nejnižší dosažená zkorigovaná energie  
 $C$  statistický parametr

Ukázka takto vyhodnocených dat pro ocel P92 je viditelná na Obr. 20.



Obr. 20 Ukázka vyhodnocených dat pro ocel P92 (X10CrWMoVNb 9-2)

Alternativní metodou pro zjištění tranzitní teploty je založen na získaném  $\varepsilon_f$ , rovnice (11). Hodnoty se zjistí pro rozsah teplot a pak statisticky vyhodnotí pomocí metody nejmenších čtverců dosazením do této funkce:

$$\varepsilon_f(T) = \frac{\varepsilon_{US} + \varepsilon_{LS}}{2} + \frac{\varepsilon_{US} - \varepsilon_{LS}}{2} \tanh\left(\frac{T - T_{SPT,\varepsilon}}{C'}\right) \quad (19)$$

Kde  $\varepsilon_{US}$  nejvyšší dosažená deformace  
 $\varepsilon_{LS}$  nejnižší dosažená deformace  
 $C'$  dosazovací parametr

Při výsledcích byl pozorován rozdíl mezi tranzitní teplotou zjištěnou při SPT a při klasických zkouškách rázem v ohybu, kdy při SPT vychází teploty nižší. V korelaci je pak nutno tento fakt zohlednit pomocí materiálové konstanty  $\gamma$ , která se často dle návrhu normy [6] pohybuje okolo hodnoty 0,4. Korelační vztah má pak tento tvar:

$$Tt_{SPT} = \gamma * Tt_{ch} \quad (20)$$

Kde  $Tt_{ch}$  tranzitní teplota zjištěná na Charpyho kladivu  
 $\gamma$  materiálová konstanta

První metodou na zjištění lomové houževnatosti je dvoukroková metoda. Spočívá ve stanovení závislosti mezi  $T_{SPT}$  a FATT zjištěných z Charpyho kladiva na zkušebních tělesech s vrubem V. Druhý krok této metody je výpočet  $K_{IC}$  přes známou závislost mezi FATT, popřípadě DBTT, a  $K_{IC}$ .

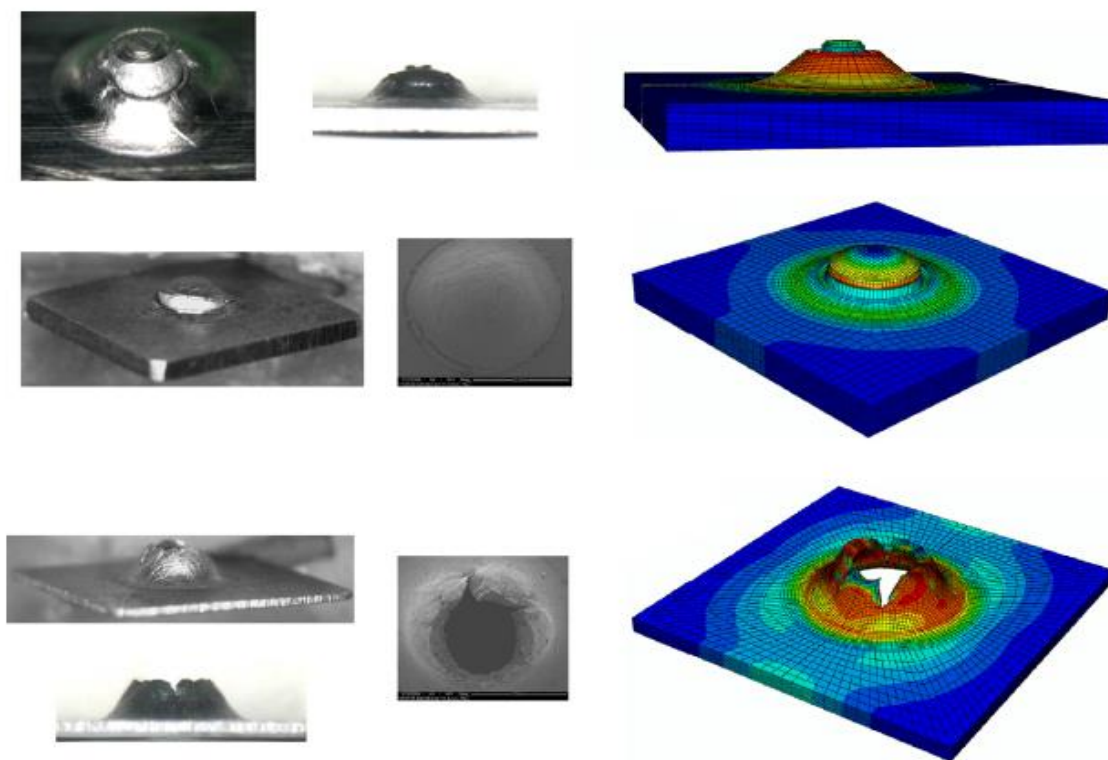
Druhou metodou je empirická korelace ze SPT na  $J_{IC}$ . Ta je provedena na základě zjištěné deformace  $\varepsilon_f$  a dvou materiálových konstant  $k$  a  $J_0$  pomocí vzorce:

$$J_{IC} = k * \varepsilon_f - J_0 \quad (21)$$

Dále je možno stanovit  $K_{IC}$ , ale pouze v případě křehkého lomu nebo výrazně dominující elastické deformace, pomocí korelace s napětím při vzniku trhliny  $\sigma_f^{SP}$  za pomoci materiálové konstanty  $C$ .

$$K_k = C * (\sigma_f^{SP})^{\frac{2}{3}} \quad (22)$$

Třetí možnou korelací dle CWA je přístup EPRI-FAA, který hodnotí hustotu deformační energie, která vyvolá šíření trhliny ve vzorku bez trhliny. Procedura spočívá v klasickém záznamu zatížení – posunutí razníku v průběhu testu s přidaným monitorováním povrchu tělesa k zjištění iniciace trhliny. Dále je nutno provést korelaci záznamové křivky s tahovou křivkou. Dále výpočet energie nutné k iniciaci trhliny pomocí MKP a Gurson-Tvergaard-Needleman modelu. Finálním krokem je určení  $J_{IC}$  při odhadu kritické síly k vyvolání energie dostatečné k šíření trhliny u standardizovaného tělesa pro zkoušku lomové houževnatosti.



Obr. 21 GTN model a porovnání simulace šíření trhliny s provedenou zkouškou

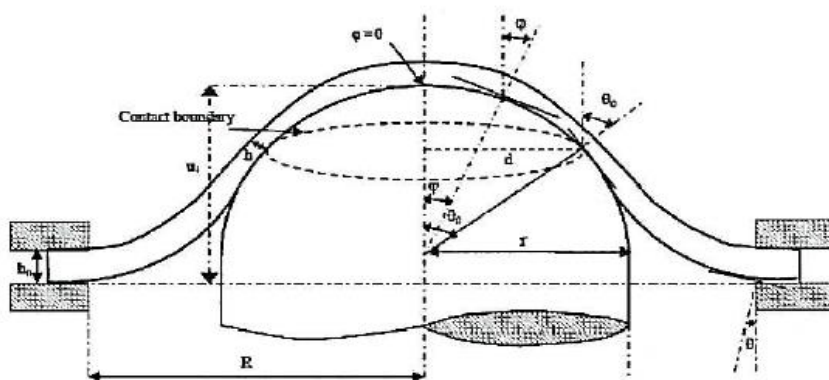
Nejnovější návrh normy již však s metodou EPRI-FAA nepočítá a místo toho navrhuje jinou metodu. Ta spočívá v provedení SPT na vzorcích viditelných na Obr. 18, které mají vybrání do svého středu. Právě toto vybrání umožní vyhodnocení jakéhokoliv směru materiálu a aplikaci lomové mechaniky vyžadující již existující defekt. Vyhodnocení lomových vlastností je pak uskutečněno pomocí zaznamenání okamžiku iniciace trhliny. Sledování iniciace trhliny může být provedeno jak opticky, tak pomocí akustické emise.

## 6.2 Vyhodnocování creepových vlastností

Základním úkolem vyhodnocení creepu je získání hodnoty zátěže pro vytvoření stejného času na vznik trhliny jako při klasickém zkoušení. Avšak díky změně rozložení napětí v průběhu creepu je hodnocení těžší. Zpočátku dochází k malým deformacím a napětí je převážně rozloženo ve stříhových složkách vyvolaných ohybovými momenty. Se zvyšující se deformací se zatížení rozkládá pomocí membránového efektu. Vzhledem k deformacím vzorku dosahujících 3-4 násobku tloušťky vzorku, popřípadě 40 %– 60% velikosti doteku vzorku s maticí, je možno zanedbat ohybové momenty a soustředit se pouze na napětí membránové. Membránová napětí jsou popsána v CWA 4 možnými rovnicemi. První uvedená rovnice vycházející z rovnováhy, Bicego 1998:

$$\frac{F}{\sigma} = \left[ 2\pi h \left( r + \frac{h}{2} \right) \sin \theta_0 \right] \sin \theta_0 \quad (23)$$

Kde  $h$  tloušťka vzorku  
 $\theta_0$  poloviční úhel kontaktu razníku s vzorkem viz



Obr. 22 Schéma pro výpočty při creep testu

V CWA je dále uvedena hodnota pro  $F/\sigma=1,876$  a  $\theta_0=\pi/4,6$  pro ocel X20CrMoV12-1 z projektu COPERNICUS.

Druhá rovnice uvedená Dobešem a Miličkou:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{[2\pi h r \tan \varphi]}{[1 + \tan^2 \varphi]^{1/2}} \quad (24)$$

Kde  $r$  poloměr zakončení puncheru  
 $h$  tloušťka vzorku v místě doteku

Tato rovnice počítá s jakýmkoliv bodem dotyku, proto se zjednodušila pouze na relevantní napětí na inflexním bodě pod úhlem  $\theta$  vzorku do tohoto tvaru:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{2\pi h r \sin \theta_0 \tan \theta_0}{(1 + \tan^2 \theta_0)^{1/2}} \quad (25)$$

Doporučovaný model rozložení napětí publikovaný Chakrabartym v roce 1970:

$$\frac{F}{\sigma} = 2\pi h r \sin^2 \theta_0 \quad (26)$$

Kde  $h = h_0 \left[ \frac{1 + \cos \theta_0}{1 + \cos \theta} \right]^2$  tloušťka vzorku na doteku

Dále bylo pomocí různých regresních analýz dosaženo korelace creepových vlastností:

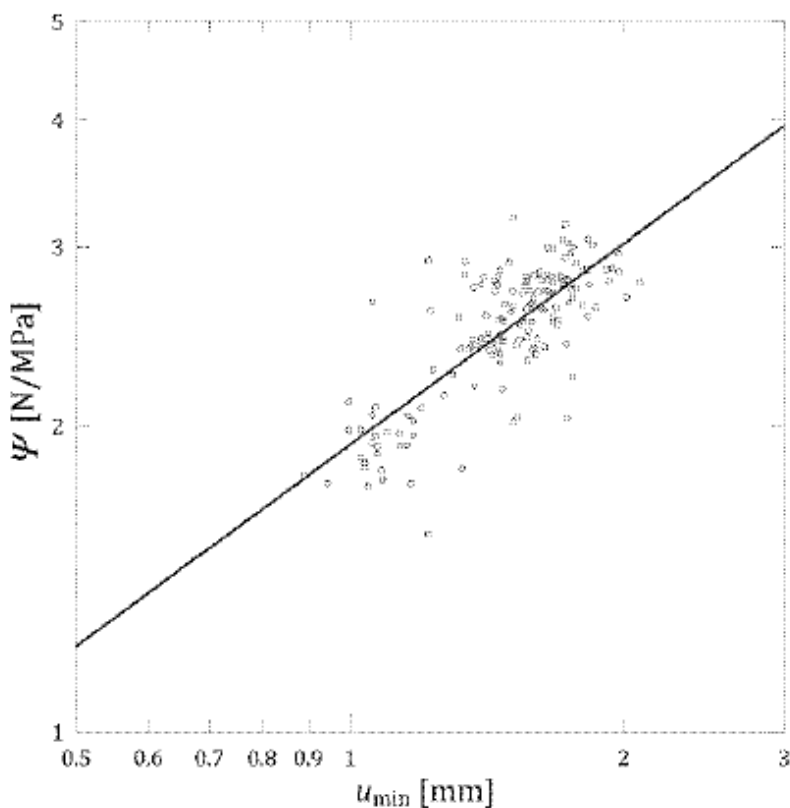
$$\frac{F}{\sigma} = 3,33 k_{SP} \frac{r^{1,2} h_0}{R^{0,2}} \quad (27)$$

Kde  $r$  poloměr puncheru  
 $D$  průměr otvoru v matici  
 $k_{SP}$  korelační parametr obsahující vliv jak materiálu, tak teploty zkoušení

V novém návrhu normy je však počítáno s dalším přístupem z důvodu omezení použití korelačního vztahu. Ten je totiž závislý na korelačním parametru  $k_{SP}$  který svou závislostí na teplotě značně omezuje použitelnost a praktičnost. Nový postup spočívá v modelu empirické konverze zatížení na napětí. Tento model byl optimalizován pomocí databáze materiálu a jejich vlastností.

$$\psi_{EFS} = \frac{F}{\sigma} = 1,916 u_{min}^{0,6579} \quad (28)$$

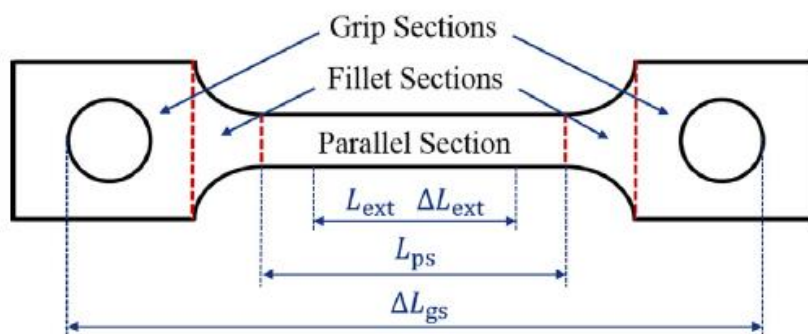
Kde  $u_{min}$  minimální průhyb vzorku



Obr. 23 Rozptyl dat pro nový postup vyhodnocování creepových vlastností

## 7 Konvenční testování miniaturních vzorků

I u konvenčních metod je snaha o minimalizaci. Nejběžnějším testem je tahová zkouška, pro kterou se používají různá miniaturní tělesa, například plochá typu dogbone viz. Obr. 24. popřípadě jiného typu na Obr. 25. Dogbone jsou zmenšená klasická poměrná zkušební tělesa, avšak mají nedostatky v několika oblastech. Největší nedostatek je v jejich velikosti, i přes zmenšení jsou stále relativně velká oproti vzorkům pro SPT, a tak není úspora materiálu tak velká. Jejich další zmenšování již ztrácí smysl, relaxace materiálu v nezatěžovaném povrchu je mnohem výraznější a způsobuje odklon výsledků od klasických zkušebních těles, na což trpí i druhý typ vzorků. Tento jev se začíná nejvíce projevovat, jakmile tloušťky vzorku dosáhnou 4 až 10 násobku velikosti zrna materiálu. Pokud se zkrátí pouze paralelní část vzorku dochází ke vzniku odchylek od hodnot prodloužení klasických zkoušek z důvodu vzniku víceosého napětí a nejednotné deformace v oblasti zaoblení. Čím kratší je, tím vyšších hodnot prodloužení se dle [5] dosahuje. Vysvětluje se to právě vlivem jiného zpevnění materiálu, deformace i v jiných místech vzorku a až následná akumulace deformace v místě krčku. Deformace v místě krčku však nezávisí na délce sekce, je vždy přibližně stejně velká, a proto má vyšší vliv u kratších těles, kdy dosahuje relativně vyšších hodnot oproti ostatním deformacím. Deformace v místech zaoblení však probíhá stále, a tak vznikají chybové odchylky na celé záznamové křivce. Tento problém navíc způsobuje zkreslení a nepřesnost výsledku měřených deformací pomocí tenzometrů, obzvláště při zkoušení za vysokých teplot. Je možnost je nahradit laserovými extenzometry nebo DIC metodou.

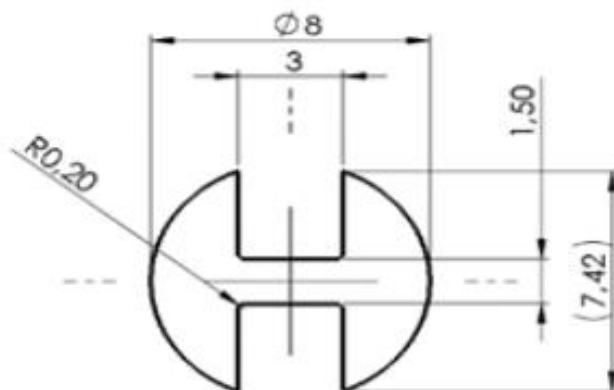


Obr. 24 Zkušební těleso dogbone



Zkreslené výsledky lze však korigovat inverzní metodou konečných prvků aplikací teorie elastické plasticity. Ani ta nedává 100% opakovatelné výsledkům z důvodu vysokého vlivu mikrostruktury materiálu, textury a mikročistoty.

Vliv tloušťky vzorků ukázal, že u tenčích vzorků dochází ke dřívějšímu tvoření krčku a lomu vzorku. Výsledkem jsou pak nižší hodnoty pevností, což se dle [21] projevuje u vzorků s tloušťkou nižší než 0,2 mm. Je to způsobeno nedostatkem krystalů možných vytvářet zpětné relaxované napětí, a tak tvořit odpor napětí tahovému, čímž dochází k menšímu zpevňování a rychlejšímu poškození.



*Obr. 25 Zkušební těleso pro tah*

## 8 Experimentální část

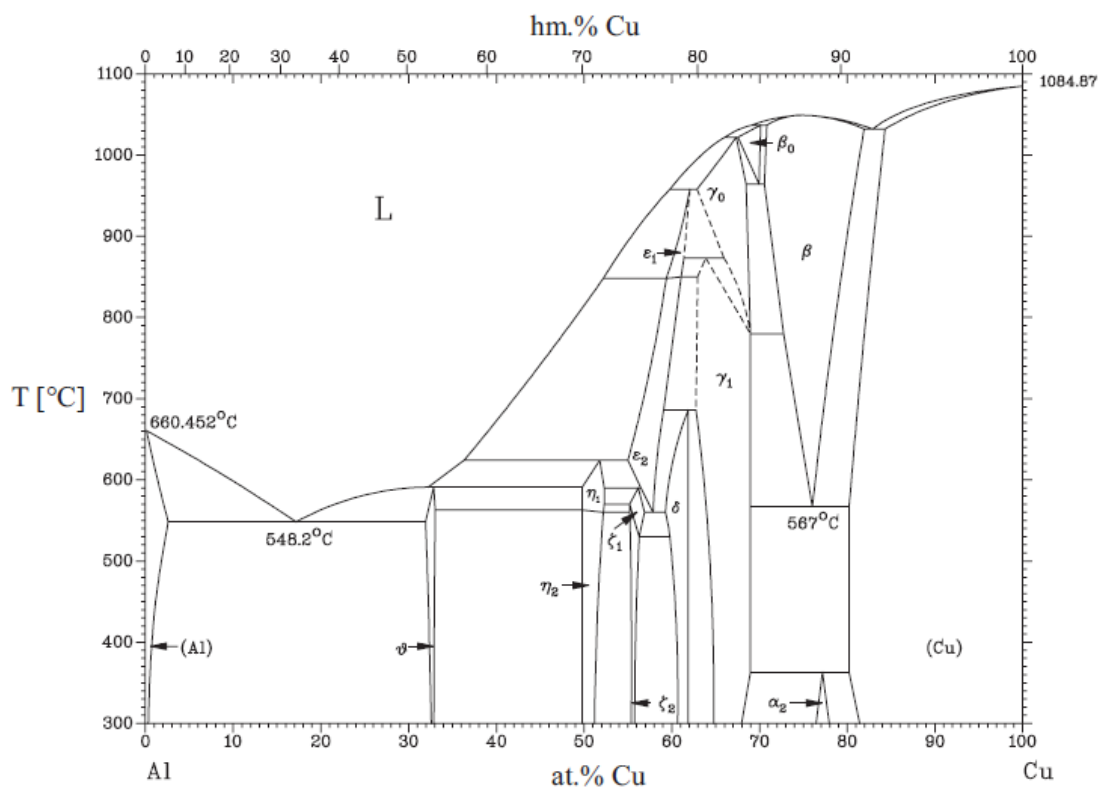
### 8.1 Testovaný materiál

Zkoušky byly provedeny na hliníkové slitině EN AW 2024 T351 tzn. AlCu4Mg1, někdy též označována jako Superdural. Je to nejpoužívanější hliníková vytvrditelná slitina. Jedná se o tvářenou slitinu, kde hlavní legující prvek je Cu a sekundárním Mg. Slitina je po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí. Tato slitina má nejvyšší hodnoty pevnosti a tvrdosti v této skupině. Je to špatně svařitelný materiál s nízkou vrubovou houževnatostí, navíc trpí nízkou odolností proti korozi a může dojít k interkrystalické korozi. Používá se pro součásti pro automotive a letecký průmysl, převážně pro trupy letadel, válce a písty a další, avšak v prostředích, kde hrozí koroze se plátuje jinou slitinou, často z řady 6xxx.

Po vyžhání tvoří strukturu jak rozpustné a zároveň vytvrzující fáze  $\text{Al}_2\text{Cu}$  a  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  s nerozpustnými např. různé fáze obsahující Fe. Vzhledem k poměru Cu:Mg 4:1 má zde vyšší vliv na zpevnění disperzní fáze  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Dochází však k tvorbě obou zpevňujících fází a to následujícími postupy:

$\text{Al}_2\text{Cu}$ : Vznik Guinier-Prestonových zón z nichž dále vznikají koherentní fáze  $\theta$  a  $\theta'$ . Z těch následně vzniká  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .

$\text{Al}_2\text{CuMg}$ : Vznik GP zón a přímo z nich vznik koherentní fáze  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ .



Obr. 26 Binární diagram Al-Cu

Pro experiment byla použita komerční slitina, vzorky byly odebrány z polotvaru o rozměrech 1000x1000x20 mm. Chemické složení je uvedeno v Tabulce 2. Základní mechanické vlastnosti podle normy v Tabulce 3.

*Tabulka 2 chemické složení dostupné z ASM Aerospace specification metals database*

Složka	Al	Cu	Mg	Mn	
hm. %	90,7 – 94,7	3,8 – 4,9	1,2 – 1,8	0,3 – 0,9	
Složka	Cr	Fe	Ti	Zn	Si
hm. %	Max 0,1	Max 0,5	Max 0,15	Max 0,25	Max 0,5

*Tabulka 3 základní mechanické vlastnosti dostupné z databáze Matmatch.com*

EN AW 2024	Modul pružnosti v tahu E	Mez kluzu $R_{p0,2}$	Mez pevnosti $R_m$	Tažnost A
	GPa	MPa	MPa	%
	70-74,5	Min 250	min. 360	min. 5

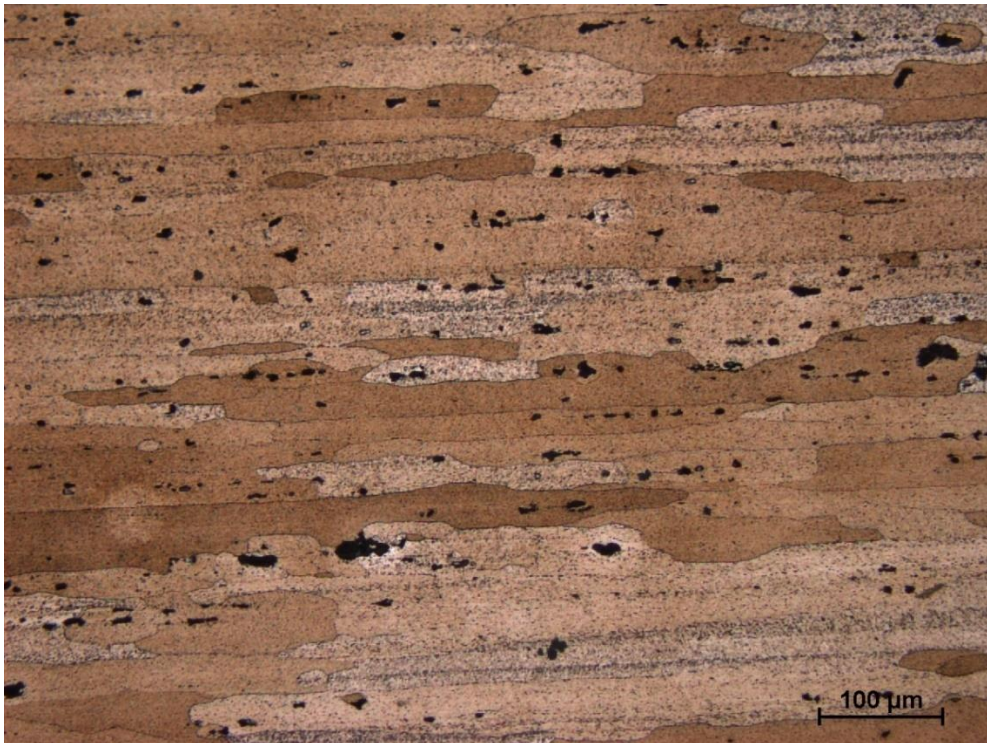
## 8.2 Metalografie

Na snímcích z metalografie je patrný vliv asymetrie struktury způsobený tvářením. Ve směru L je nejvýraznější, jak je viditelné na Obr. 27, kdy zrna materiálu jsou velmi úzká a protáhla podle směru tváření. Tím také došlo k jisté orientaci vměstků typu Al-Cu-Fe-Mn, na Obr. 28 viditelné jako černé fáze.



*Obr. 27 snímek mikrostruktury v L směru*



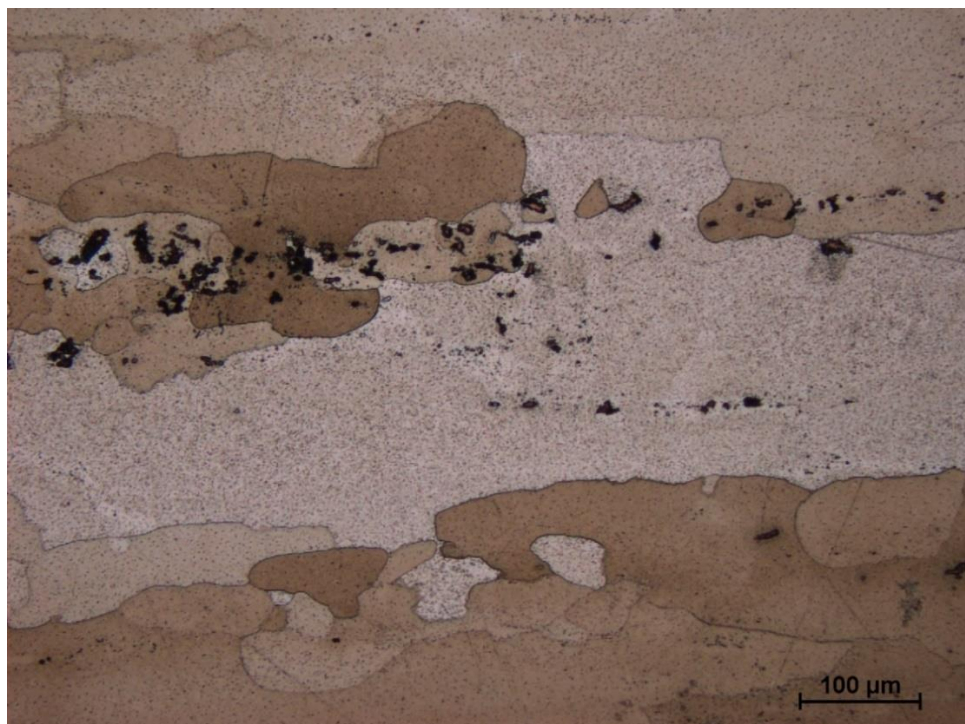


*Obr. 28 Snímek mikrostruktury v L směru*

Ve směru T je misorientace méně výrazná než ve směru L. Vměstky se vyskytují více jako aglomeráty, oproti rovnoměrnějšímu rozložení jako v L směru, a i rozložení jemného precipitátu  $\text{Al}_2\text{Cu}$  je zde hůře pozorovatelné. Precipitáty jsou pozorovatelné na Obr. 30 jakožto velmi jemně rozptýlená fáze.



*Obr. 29 Snímek mikrostruktury v T směru*



Obr. 30 Snímek mikrostruktury v T směru

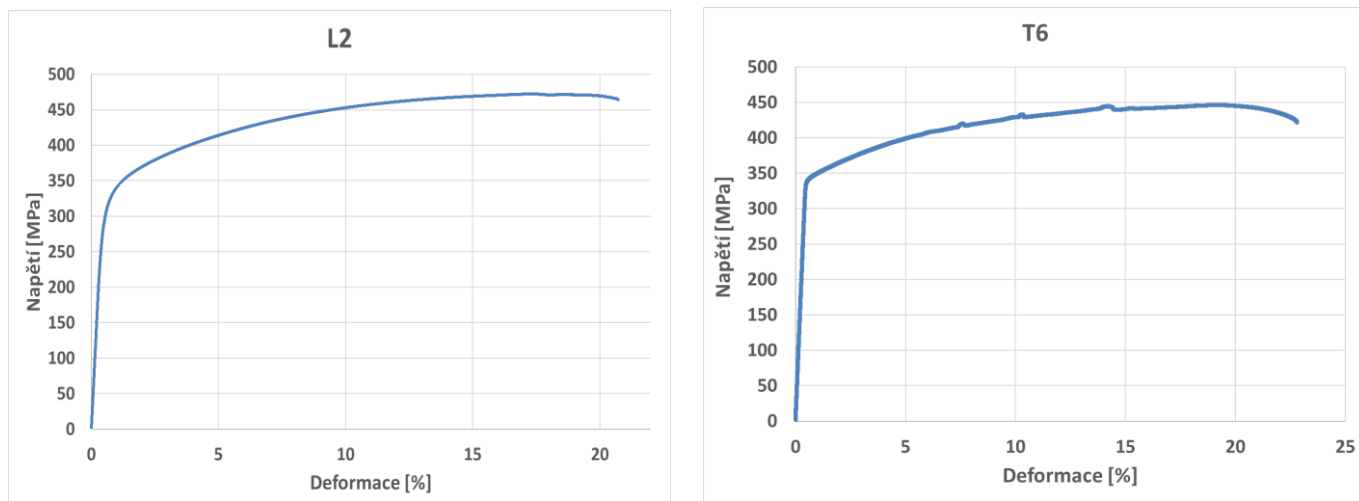
### 8.3 Tahové zkoušky

Pro materiál byly provedeny tahové zkoušky na několika vzorcích o rozměrech 6x30 mm dle normy DIN 50125. Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Vzorky byly odebrány v L a T směru, W směr nemohl být zkoušen z prostého nedostatku materiálu v tomto rozměru pro získání vzorku. Data z tahové zkoušky je možno vidět v Tabulce 4.

Tabulka 4 data z tahové zkoušky

Tah Data							
Vzorek	E	R <sub>p0,2</sub>	F <sub>m</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>g</sub>	A	Z
	[GPa]	[MPa]	[N]	[MPa]	%	%	%
L1	73,68	312,26	12923,41	471,10	17,20	19,22	20,49
L2	72,01	313,55	12904,38	472,00	16,64	20,09	17,47
L3	71,42	312,88	12924,12	471,12	16,31	18,91	21,09
L4	75,89	310,87	12982,00	473,24	16,61	19,62	19,27
L5	73,75	311,70	12950,85	472,10	16,86	18,97	19,27
Průměr	73	312	12937	472	17	19	20
T2	70,17	345,09	12325,66	449,31	22,96	27,32	29,00
T3	73,60	342,24	12273,97	447,42	15,39	24,31	30,41
T4	74,37	344,47	12370,29	447,90	15,36	24,04	37,98
T5	75,01	344,58	12384,46	448,41	18,37	26,39	28,34
T6	74,02	343,30	12315,82	445,93	18,64	22,24	27,19
Průměr	73	344	12334	448	18	25	31
Celk. prům	73	328	12635	460	17	22	25

Jak je vidět v Tabulce 4, T směr vykazuje vyšší hodnoty meze kluzu, ale naopak nižší hodnoty meze pevnosti. Dá se předpokládat, že způsob výroby bylo křížové válcování, které vedlo k snížení anizotropie vlastností. Dále je na záznamu viditelná ostřejší mez kluzu  $R_e$  ve směru T oproti L směru, viz Obr. 31, to naznačuje větší vliv precipitátů  $Al_2Cu$  na bránění pohybu dislokací. Dále je na záznamu patrný Portevin-Le Chatelierův jev. Ten je interakcí pohybujících se dislokací o zpevňovací precipitáty. Dislokace musí tyto precipitáty buď obejít nebo roztříštit, což se projeví chvilkovým zvýšením zatížení na hodnotu nutnou k průrazu nebo vytlačení precipitátu, a následným poklesem k původnímu průběhu.



Obr. 31 Porovnání průběhů tahových zkoušek v L a T směru

## 8.4 Popis experimentu

Experiment byl proveden na univerzálním zkušebním zařízení Zwick/Roell Z250. SPT byl proveden na 9 různých vzorcích po 3 odebraných z každého směru, tzn. L, W a T. Důvodem bylo pozorování asymetrie způsobené předchozím zpracováním materiálu. Vzorky byly odebrány jako tyče o průměru 8 mm v příslušném směru. Z tyčí byly následně elektrojiskrově odřezány disky o tloušťce 0,65 mm a následně pomocí speciálního přípravku broušeny oboustranně za mokra na tloušťky 0,5 mm. Broušení probíhalo pomocí brusných papírů se zrnitostmi 400, dále 600 a 1000. Finální rozměry vzorků jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 5 rozměry vzorků pro SPT

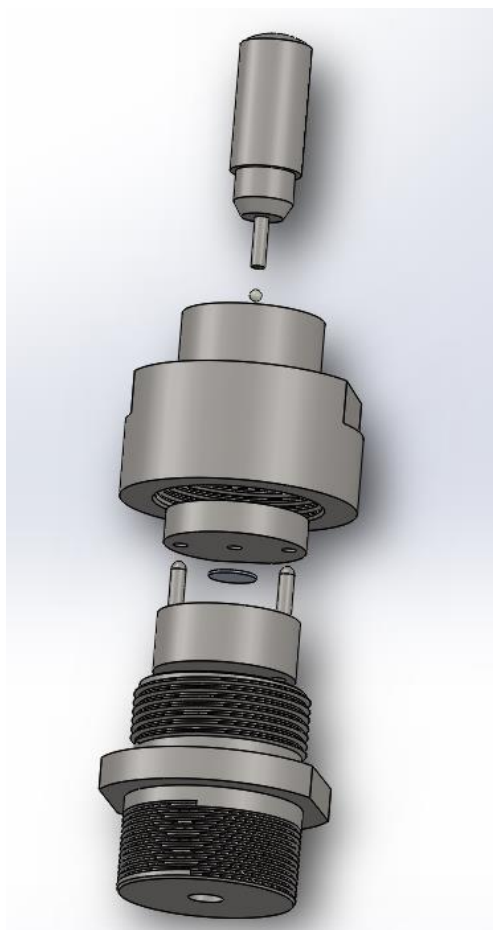
Vzorek	$d_0$	$h_0$
	mm	mm
L1	8	0,505
L2	8	0,502
L3	8	0,5
T1	8	0,483
T2	8	0,5
T3	8	0,495
W1	8	0,502
W2	8	0,507
W3	8	0,493



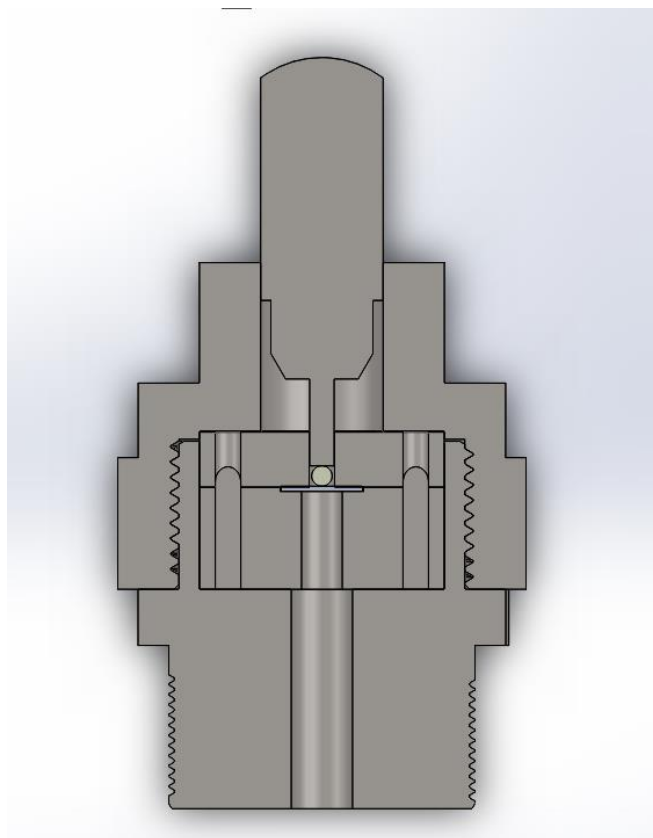
Již na záznamových křivkách z SPT je možno pozorovat rozdíly v průběhu zkoušky způsobené strukturou. I výsledky maximálních sil vykazují rozdíly patrné ze směru tváření materiálu. Řízenou veličinou byla rychlost posuvu razníku, ta byla nastavena na 1 mm/min.

Testy byly provedeny pomocí speciálně vyrobených přípravků upevňujících se na stroj. Jedná se o horní a dolní matici na uchycení zkušebního vzorku, razník, kuličku a celou patronu, která se našroubuje na stroj. Výkresová dokumentace přípravků je viditelná v přílohách a 3D model v rozloženém pohledu na Obr. 32 a řez modelem na Obr. 33. Materiálově se jedná o součásti z oceli X46Cr13 zušlechťenou minimálně na 40HRC. Původně byly uvažovány dvě možnosti spojení horní a dolní matice pro vzorek. Závitová studie se ukázala být nevhodnou z důvodu vnesení krutu do vzorku a zkreslování průběhu a výsledků zkoušky. Druhá studie počítala se spojením matice pomocí dvou šroubů M8x35. Nakonec z důvodů dostupnosti dílenských nástrojů byl použit třetí návrh spojení matice pomocí čepů.

Výkres tohoto návrhu je v Příloze 1, na spodní část matice byly vyrobeny dva čepy, které zapadnou do protikusu v matici, následně pod zatížením dojde k jejich fixaci. Největší rozdíl je absence trnu pro LVDT, ten je nahrazen měřením pomocí kontaktů extenzometru uchycujícím se na razník a horní část přípravku, viditelné na výkrese v Příloze 1.



*Obr. 32 Rozložený pohled 3D modelu*



Obr. 33 Řez modelem sestavy

## 8.5 Zjištění hodnoty $F_e$ a $F_m$

Korelace výsledků podle metody CWA obsahovala aproximace záznamových křivek vzorků do matematických lineárních funkcí uvedených v kapitole 6.1.1 pro zisk  $F_e$ , rovnice (4) a (5). Získání  $F_m$  je mnohem lehčí a spočívá pouze v nalezení maximálního zatížení v záznamu. Pro  $F_e$  bylo třeba nalézt body pro aproximaci, které vykazovaly nejmenší chybu  $err$ , tzn. rozdíl součtu čtverců pod přímkami aproximace a záznamem, ale zároveň odpovídaly síle na mezi kluzu.

$$f(u) = \frac{f_A}{u_A} u ; \text{ pro } 0 \leq u < u_A \quad (4)$$

$$f(u) = \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A ; \text{ pro } u_A \leq u < u_B \quad (5)$$

Toho bylo docíleno pomocí lineárních regresí omezovaných různými body na horní a dolní části křivek. Z takto získaných rovnic byl výpočtem zjištěn parametr  $u_A$ . Se známým parametrem  $u_A$  byl vypočten parametr  $f_A$  a získat tak aproximační funkce viz. rovnice (4) a (5). Jako bod  $u_B$  byla zvolena, dle doporučení normy, původní tloušťka vzorku  $h_0$ . Umožňuje to rychlejší aproximaci, protože změny v  $u_B$  dále prodlužují zpřesňování aproximace, jakožto další volný parametr. Pro parametr  $u_B$  se získal  $f_B$  zjištěním funkční hodnoty záznamu. Pokud neexistuje přímo bod  $u_B$  v záznamu, je možno získat hodnotu  $f_B$  pomocí lineární závislosti dvou okolních bodů, vzhledem k jejich minimálnímu rozdílu je přesnost více než dostatečná.

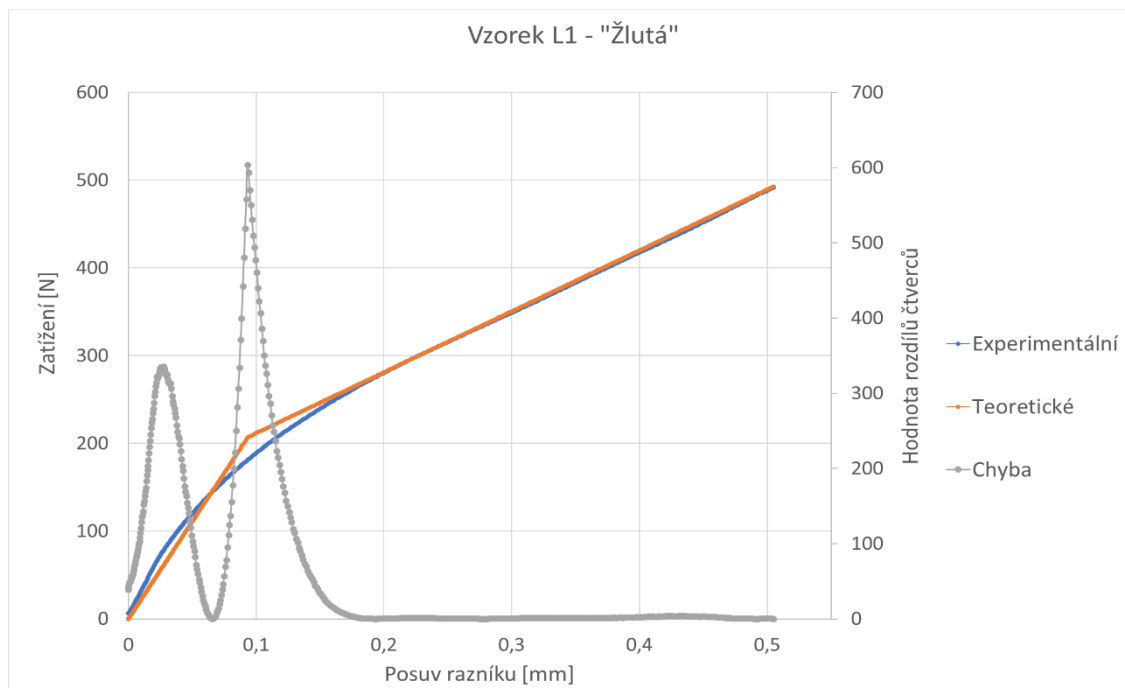


První sada vzorků 1-3, tzn. směr L, pro SPT neměla jakékoliv výchyly v průběhu záznamu, problémy zde způsoboval až příliš mírný přechod elastické a plastické oblasti. Optimalizace zde spočívala hlavně v nalezení horního a dolního omezujícího bodu pro zjištění aproximačních přímk. Pro příklad na prvním vzorku vypadala optimalizace pomocí dat viditelných v Tabulce 6.

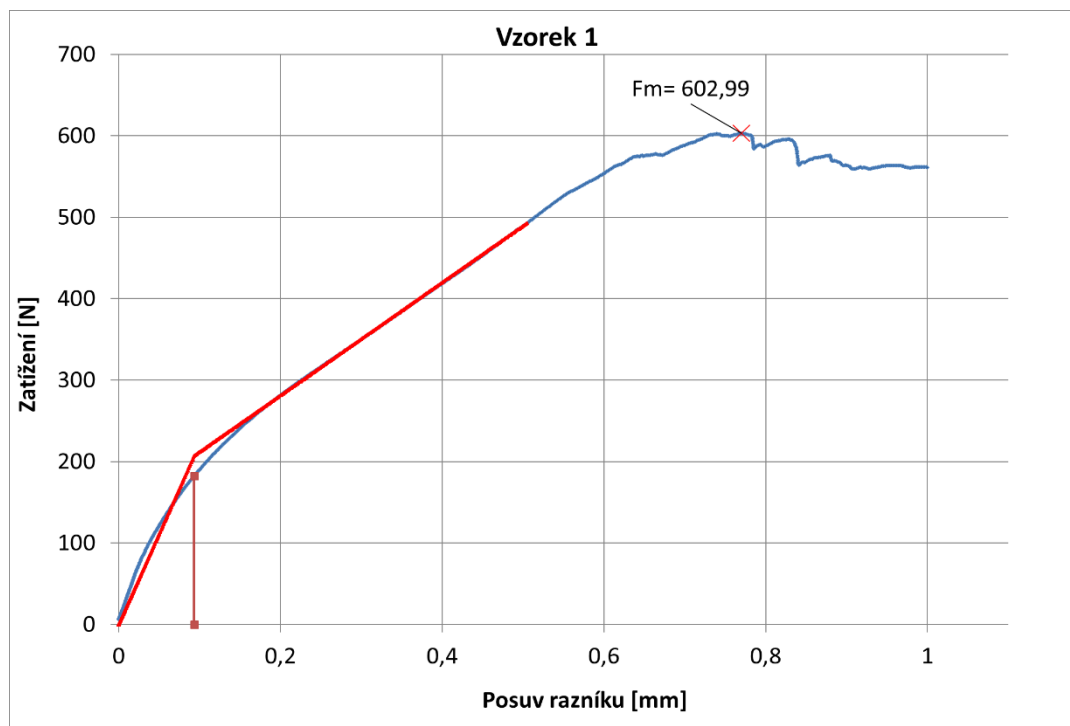
Tabulka 6 ukázka optimalizační tabulky pro vzorek L1

ub	0,504965						
Fb	492,8238						
	H	D	ua	fa	fa/ua	fb-fa/ub-ua	err
1.	0,153202	0,051029	0,0784951	196,309	2500,909	695,2765498	38,42
2.	0,190016	0,069241	0,0893399	205,474	2299,913	691,3673776	42,22
3.	0,156967	0,039232	0,0722935	192,306	2660,073	694,5630134	48,89
4.	0,160772	0,078513	0,0933985	207,150	2217,916	694,1129099	29,73
5.	0,150826	0,105442	0,1059881	215,165	2030,086	695,9265574	33,22
6.	0,160772	0,074306	0,0913628	205,744	2251,944	690,6130121	30,03

Veličiny H a D jsou hodnoty posuvu, které omezovali data pro získání aproximačních funkcí. Hodnota  $u_a$  byla následně získána jakožto průsečík těchto funkcí a z nich následně hodnota  $f_a$ , jakožto jejich funkční hodnota. Dále jsou v Tabulce 6 hodnoty pro dosazení do funkcí uvedených v CWA, rovnice (4) a (5), pro následný výpočet hodnot pro celý záznam. Tyto hodnoty jsou nutné pro získání chyby aproximace  $err$ , která porovnává plochu pod záznamovou křivkou a plochu pod aproximačními přímkami. U vzorku L1 tato funkce vykazovala o něco vyšší hodnoty z důvodu mírného a dlouhého přechodu elastické a plastické oblasti. Chybová funkce pro vzorek 1 je vidět na Obr. 34.

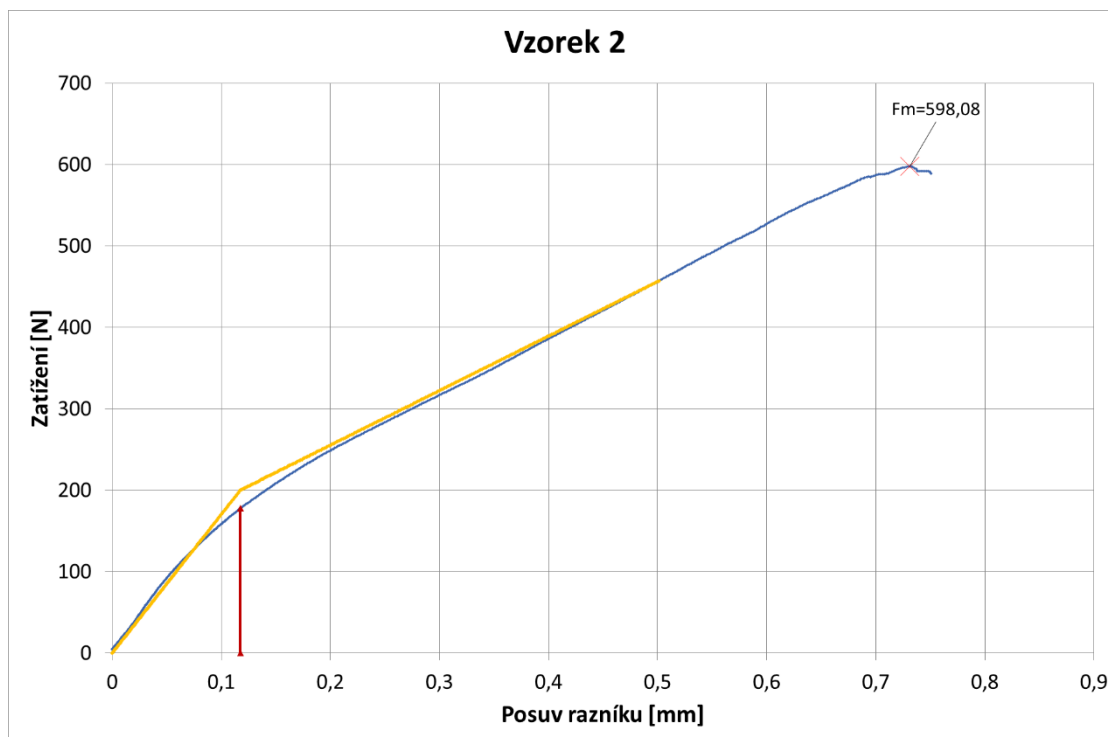


Obr. 34 Aproximace  $F_e$  dle CWA pro vzorek 1 s chybovou funkcí



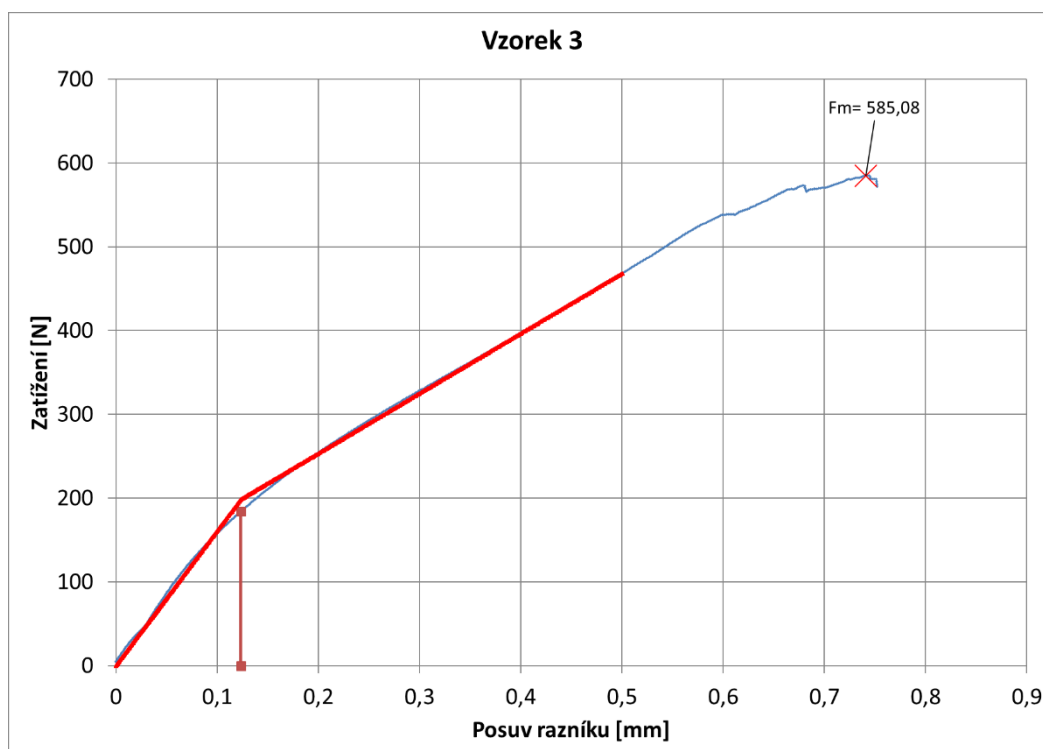
*Obr. 35 Aproximace pro vzorek 1*

Rozdílný problém se ukázal u vzorku 2, kde sice optimalizací docházelo ke snížení hodnoty err, avšak hodnota  $F_e$  se posunovala do hodnot mimo očekávanou hodnotu pro  $R_e$  a ani neodpovídala ostatním dvěma vzorkům v tomto směru. To bylo způsobeno mírným rozdílem ve sklonu mezi elastickou a plastickou oblastí, ale na rozdíl od vzorku L1 zde byl přechod velmi krátký. Tím pádem docházelo k posunutí  $F_e$  do příliš nízkých hodnot, v prvních případech dokonce až do elastické oblasti. Proto nakonec byla zvolena aproximace s nejvyšší chybovou hodnotou, avšak vizuálně i svou hodnotou odpovídala více ostatním hodnotám a umístěním  $R_e$ .



*Obr. 36 Aproximace pro vzorek 2*

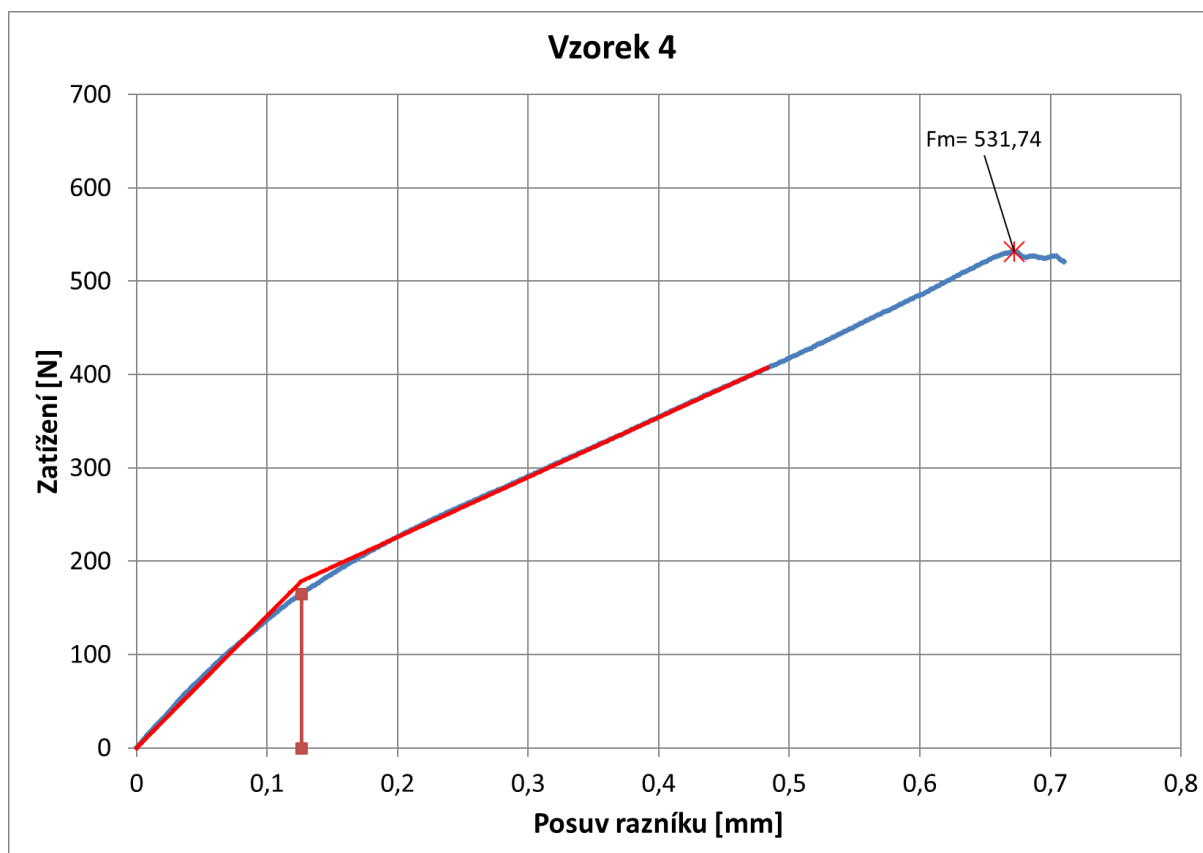
Vzorek L3 již vykazoval správnou hodnotu  $F_e$  i při nejmenší hodnotě chyby, a tak s jeho vyhodnocováním nebyl žádný problém.



*Obr. 37 Aproximace pro vzorek 3*

Ve směru T vykazoval záznam opět mírný přestup z elastické do plastické části, což má za následek vyšší hodnoty chybové funkce. Narozdíl od tahu zde však síla na mezi kluzu  $F_e$  vychází nižší než u L směru. Tento jev je částečně způsoben nižší tloušťkou vzorku.

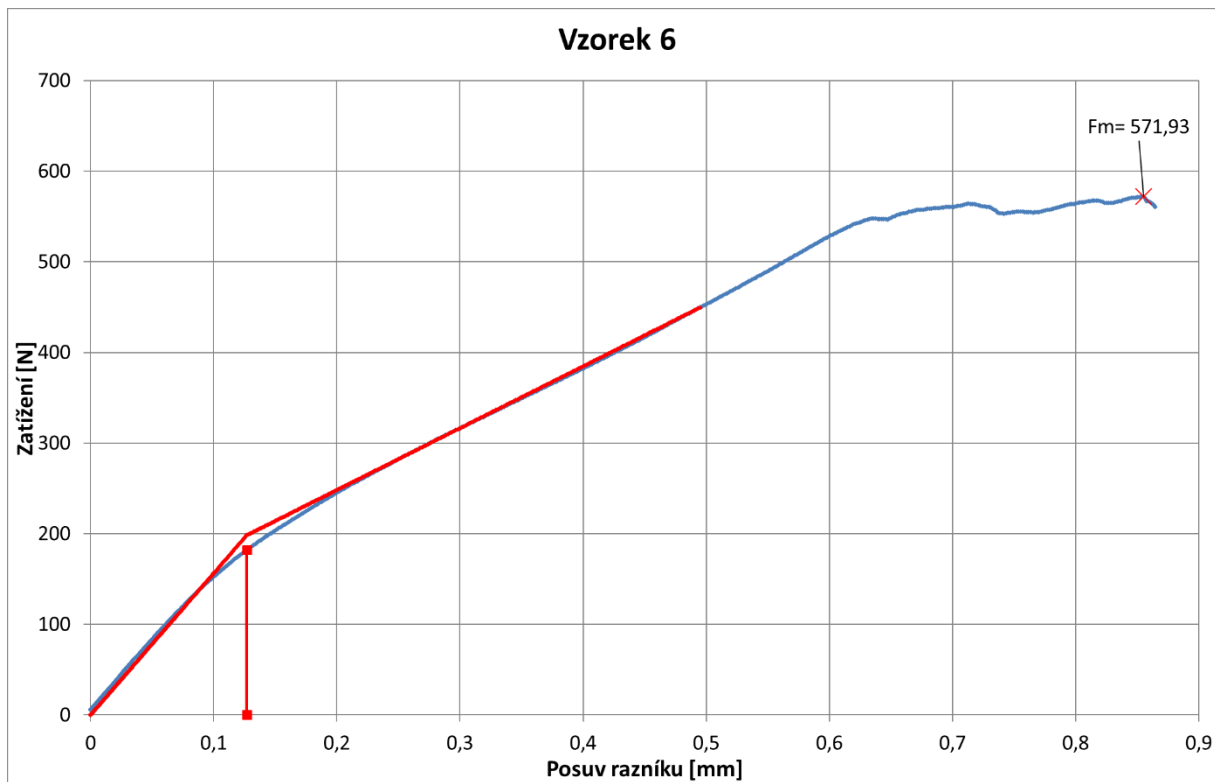
Jediný problémový vzorek u sady ze směru T byl vzorek číslo 5. Ten vykazoval v elastické oblasti snížení zatížení za zvýšeného posuvu razníku. To může být prosté dosednutí kuličky na vzorek. Taktéž to může naznačovat přítomnost vměstku, který ulehčuje průběh deformace i při nižším zatížení. Bez ohledu na důvod, pro korelaci to znamená zkreslení aproximace pomocí přímek, jelikož přímost elastické oblasti je tímto znehodnocena. Bylo tedy nutno opět brát menší potaz na chybovou funkci a místo ní se soustředit na umístění a sklon přímky, aby co nejlépe kopírovala sklon elastické části mimo zkreslení vměstku. Pro ukázkou je na Obr. 39 vyznačena zeleně i aproximace  $F_e$  s nejmenší chybovou hodnotou, která však neodpovídá vizuálně hodnotě  $F_e$  a je v plastické oblasti.



Obr. 38 Aproximace pro vzorek 4

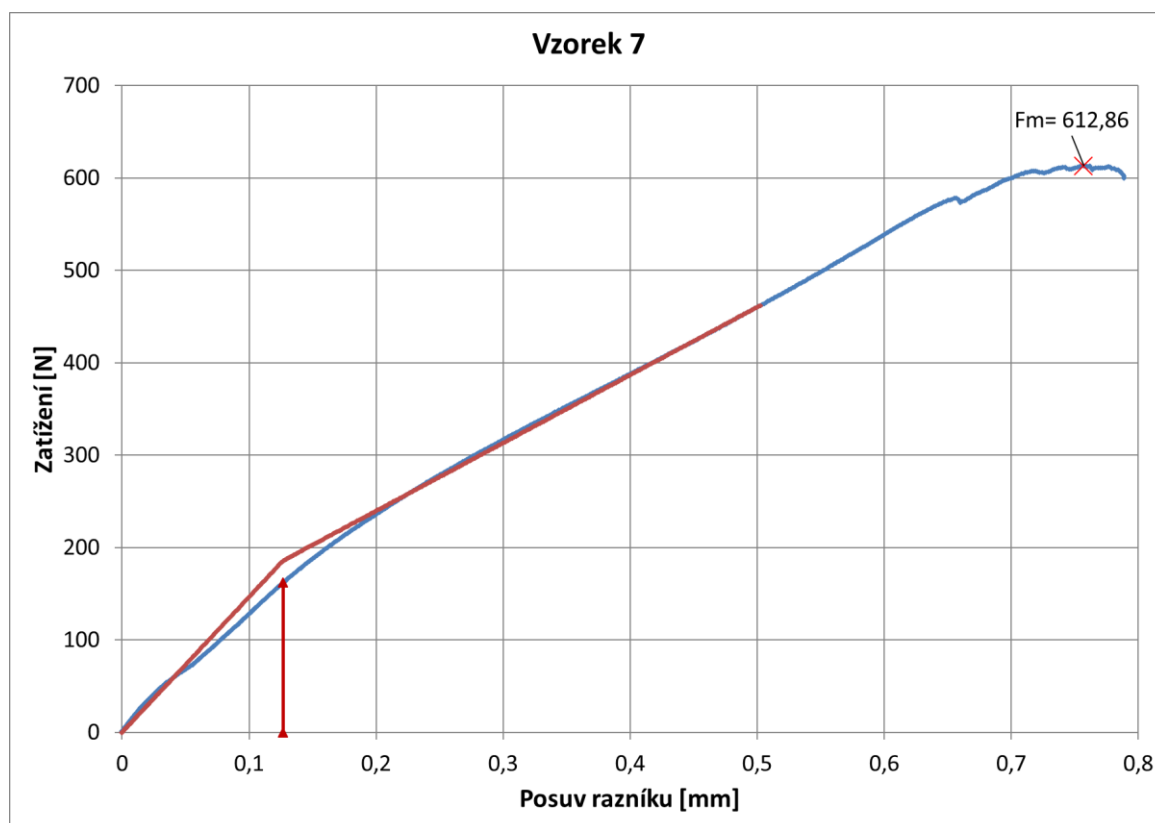


Obr. 39 Aproximace pro vzorek 5

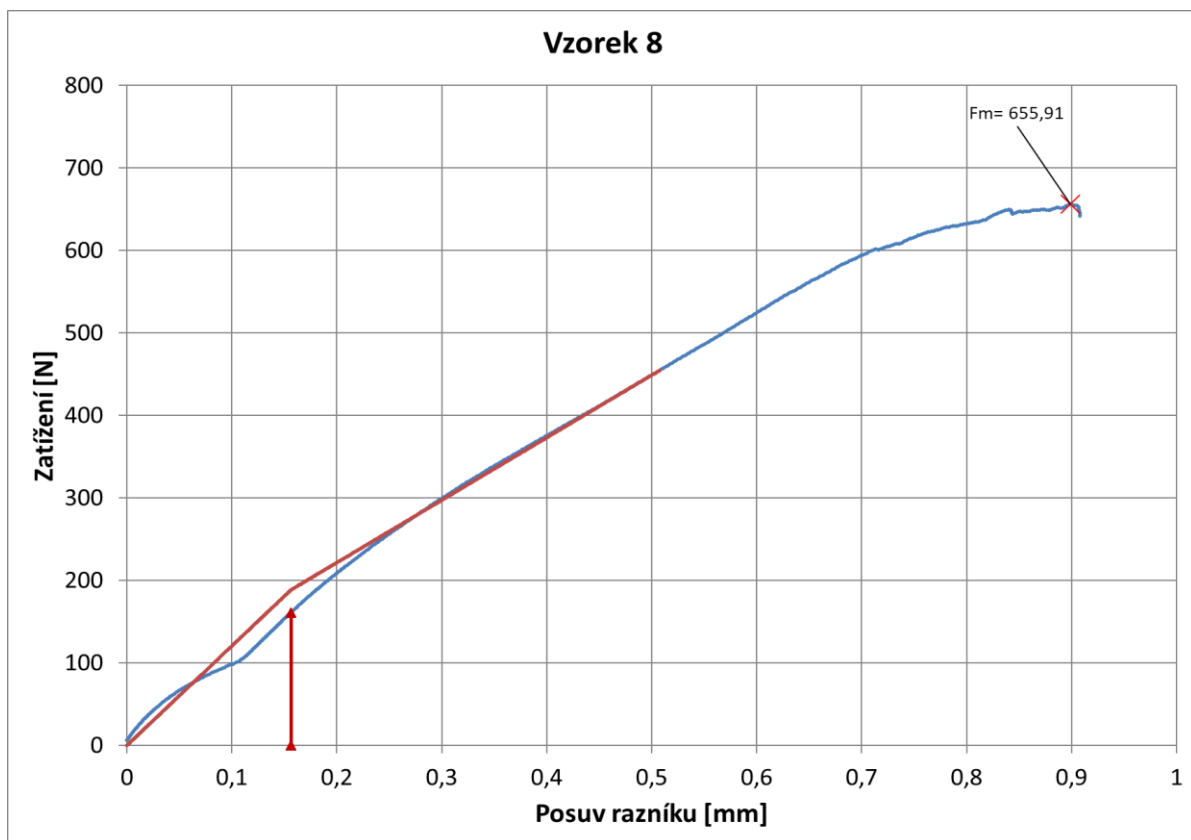


Obr. 40 Aproximace pro vzorek 6

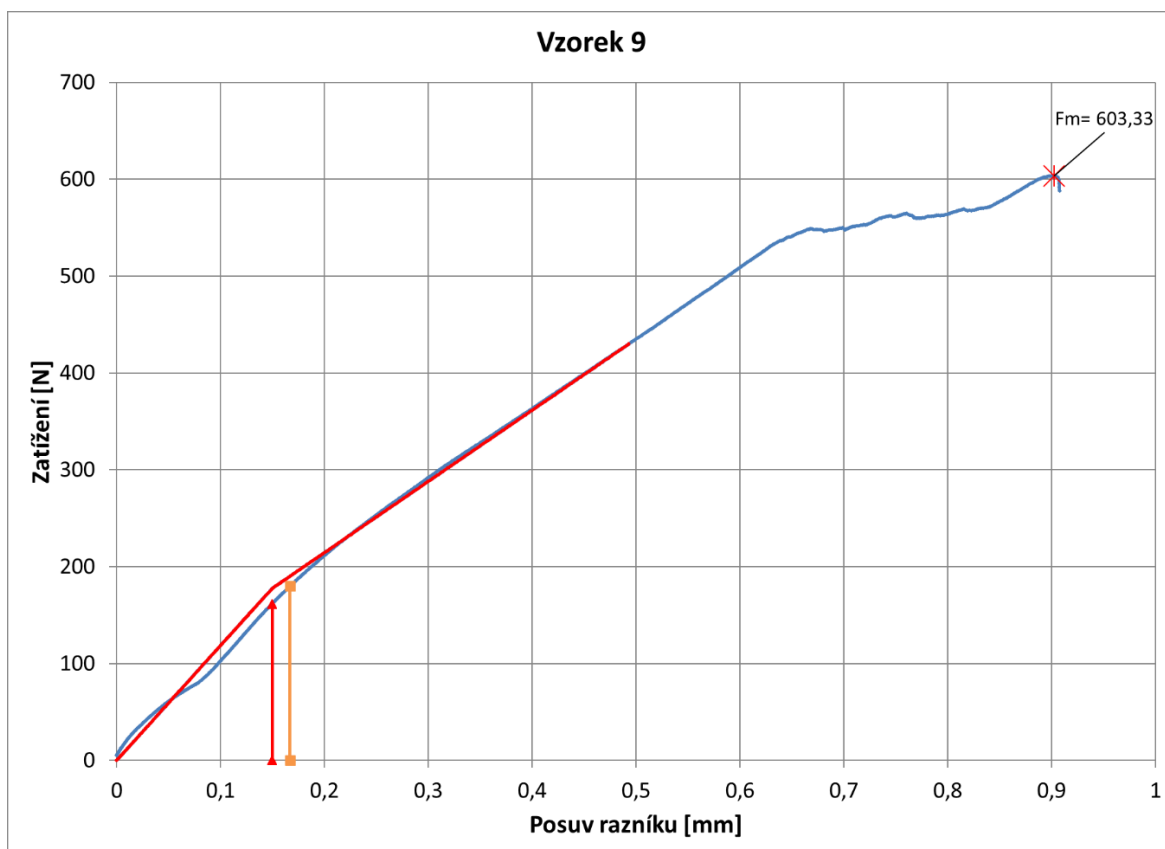
Největší problémy vykazovali vzorky ze směru W. Zde se u všech projevil zkreslující jev v elastické oblasti. Dochází zde k deformaci vzorku za mírného zvyšování síly oproti zbylému průběhu zkoušky. Opět je možné pouhé dosednutí kuličky na vzorek. Avšak vzhledem k nízké původní tloušťce plechu a shlukům vměstků je možné, že zde docházelo ještě k vyššímu vlivu vměstků. Tento vliv byl zvýšen průběhem tváření, kdy vměstky byly orientovány nevhodným směrem, pro průběh napětí při testování. Mohlo dojít i k odběru z místa s jejich vysokou koncentrací. Toto se nepříznivě projevilo na výsledných hodnotách  $F_e$ , která vycházela nižší než u ostatních dvou směrů. Navíc i samotná aproximace vycházela s vysokou hodnotou chyby, protože výrazné vybočení od průběhu zatížení zvýšilo vzniklý rozdíl mezi aproximačními přímkami a reálnou křivkou. To způsobilo, že hodnota chyby byla spíše orientačním parametrem, nikoli určujícím, protože jak bylo vidno na vzorku 5 hodnota s nejmenší chybou u takto ovlivněných vzorků vychází až v plastické oblasti. Toto je krásně viditelné na aproximaci posledního vzorku, viz. Obr. 43, hodnota vyznačená oranžově ukazuje výsledek aproximace s nejnižší chybou. Síla  $F_m$  u této sady vychází naopak vyšší než u ostatních vzorků. Je možné že v tomto směru se více projevovali precipitáty v oblasti kluzu.



Obr. 41 Aproximace pro vzorek 7



*Obr. 42 Aproximace pro vzorek 8*



*Obr. 43 Aproximace pro vzorek 9*

## 9 Výsledky a diskuse

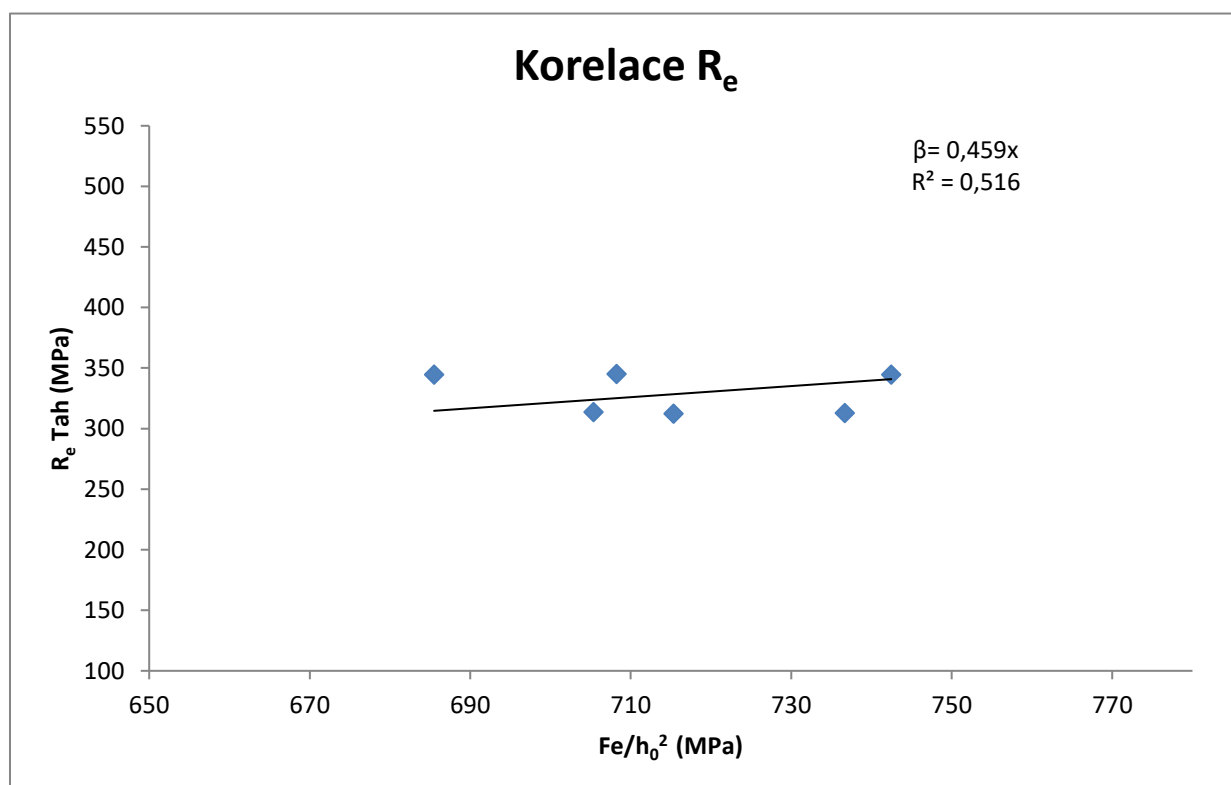
Ke korelaci byly využity data z Tabulky 7, pro které byla provedena lineární regrese. Vzhledem k nižšímu počtu dat oproti dalším zdrojům je zde i hodnota spolehlivosti nižší, avšak výsledné hodnoty korelací se získaným koeficientem odpovídají vlastnostem této slitiny.

Tabulka 7 vstupní data pro korelace

SPT	F <sub>m</sub>	F <sub>e</sub> CWA	u <sub>m</sub>	h <sub>0</sub>	F <sub>m</sub> /u <sub>m</sub> h <sub>0</sub>	F <sub>m</sub> /h <sub>0</sub> <sup>2</sup>	F <sub>e</sub> CWA/h <sub>0</sub> <sup>2</sup>	Korelace		
								Vzorek	Re	Rm
	[N]	[N]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			
1	602,99	182,43	0,7697	0,505	1551,27	2364,44	715,33	L1	312,26	471,10
2	598,08	177,75	0,7311	0,502	1629,59	2373,31	705,35	L2	313,55	472,00
3	585,08	184,16	0,7408	0,500	1579,55	2340,31	736,65	L3	312,88	471,12
4	531,74	165,23	0,6722	0,483	1637,67	2279,32	708,25	T2	345,09	449,31
5	613,02	171,37	0,8364	0,500	1465,82	2452,08	685,50	T4	344,47	447,90
6	571,93	181,92	0,8551	0,495	1351,27	2334,17	742,47	T5	344,58	448,41

Pro korelaci R<sub>m</sub> byly použity dva vztahy na výpočet napětí z SPT, první dle CWA, s použitím jak h<sub>0</sub>, tak u<sub>m</sub>. Druhou metodou je použití pouze h<sub>0</sub><sup>2</sup> jak původně navrhovali Mao a Takahashi.

### 9.1 Korelace R<sub>e</sub>



Graf 1 korelace R<sub>e</sub>



Korelační koeficient pro provedený experiment je roven hodnotě  $\beta = 0,459$ , s hodnotou spolehlivosti  $R^2 = 0,516$ . Koeficient se mírně liší od snahy o univerzální v návrhu normy, který je roven  $\beta = 0,51$ , ale zde je třeba počítat s tím, že tato hodnota počítá s jiným vyhodnocením Fe. Avšak z výsledků získaných zde je možné, že by výsledné hodnoty  $R_e$  byly mnohem vyšší a nepřesné. Fe dle návrhu normy je totiž ve vyšších hodnotách než získaná metodou CWA, protože se nejedná o promítnutí na záznamovou křivku. Možná dochází ke korekci použitím hodnot s nejnižší err funkcí nebo použitím většího množství vzorků. Na rozdíl od návrhu normy však získaný koeficient dle Garcii a kol [16], který je roven  $\beta = 0,476$ , kde bylo provedeno testování na několika různých materiálových skupinách i EN AW 2024, více odpovídá získanému z této korelace.

Vypočtené hodnoty pomocí rovnice (9) z korelací jsou viditelné v Tabulce 8, kde je vyznačen i jejich rozdíl oproti průměrné hodnotě  $R_e$  získané z tahových zkoušek (Tabulka 4), která byla rovna 328 MPa. U směrů L a T byl proveden i rozdíl pro směrový průměr hodnoty  $R_e$ , které byly rovny:

$R_{eL} = 312 \text{ MPa}$

$R_{eT} = 344 \text{ MPa}$

$$R_{p0,2} = \beta_{Rp0,2} \frac{F_e}{h_0^2} \quad (9)$$

Tabulka 8 získané hodnoty a jejich rozdíl oproti tahu

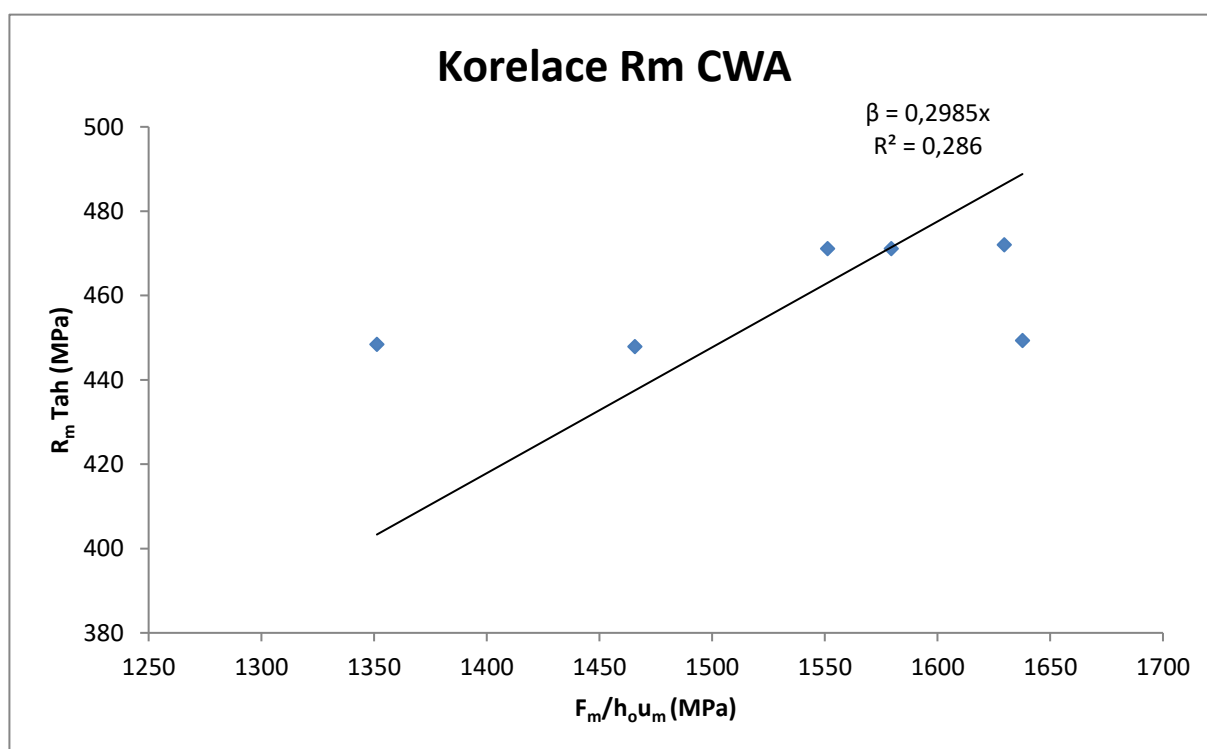
Vzorek	Re SPT	Re Rozdíl SPT a tah	
		Celk	Směr
	[MPa]		
1	328,34	0,24	16,08
2	323,75	-4,34	11,50
3	338,12	10,03	25,87
4	325,08	-3,01	12,83
5	314,64	-13,45	2,39
6	340,80	12,70	28,54
7	295,14	-32,96	
8	287,78	-40,31	
9	305,33	-22,77	

Nejvyšší rozdíly vypočtených hodnot dle rovnice (9) jsou u vzorků ve směru W. To je způsobeno samotným odchýlením hodnot síly Fe. Vzorky v ostatním směru vykazují přesnou korelaci s rozdílem maximálně 13 MPa. Použitím většího množství vzorků by se dala korelace ještě zpřesnit.

## 9.2 Korelace $R_m$

Korelační koeficient  $\beta=0,2985$  získaný metodou podle CWA vychází vyšší než u snahy o univerzální hodnoty uvedené v práci [22], kde univerzální  $\beta=0,278$ , avšak nejbližší se přibližuje vyšlé hodnotě pro mez pevnosti korelační koeficient pro martenzitickou Eurofer 97,  $\beta=0,299$ , což naznačuje jistou možnou závislost pevnostních vlastností různých materiálů, které jsou svou strukturou zpevňovány. Obdobný výsledek je i u práce Garcie a kol. [16], kde je  $\beta=0,277$ , tato práce obsahovala pro experiment i stejný materiál. Je zde patrná nízká hodnota spolehlivosti  $R^2=0,286$  oproti korelaci  $R_e$ , ukazuje to vyšší rozptyl získaných dat. Ten je způsoben rozdílnými hodnotami  $F_m$  pro každý vzorek, ta je závislá na tloušťce vzorku a jak je viditelné v Tabulce 7, její hodnoty se pohybovali od 530 N do 613 N. Korelace proběhla pomocí rovnice (12) tzn. podle návrhu normy CWA.

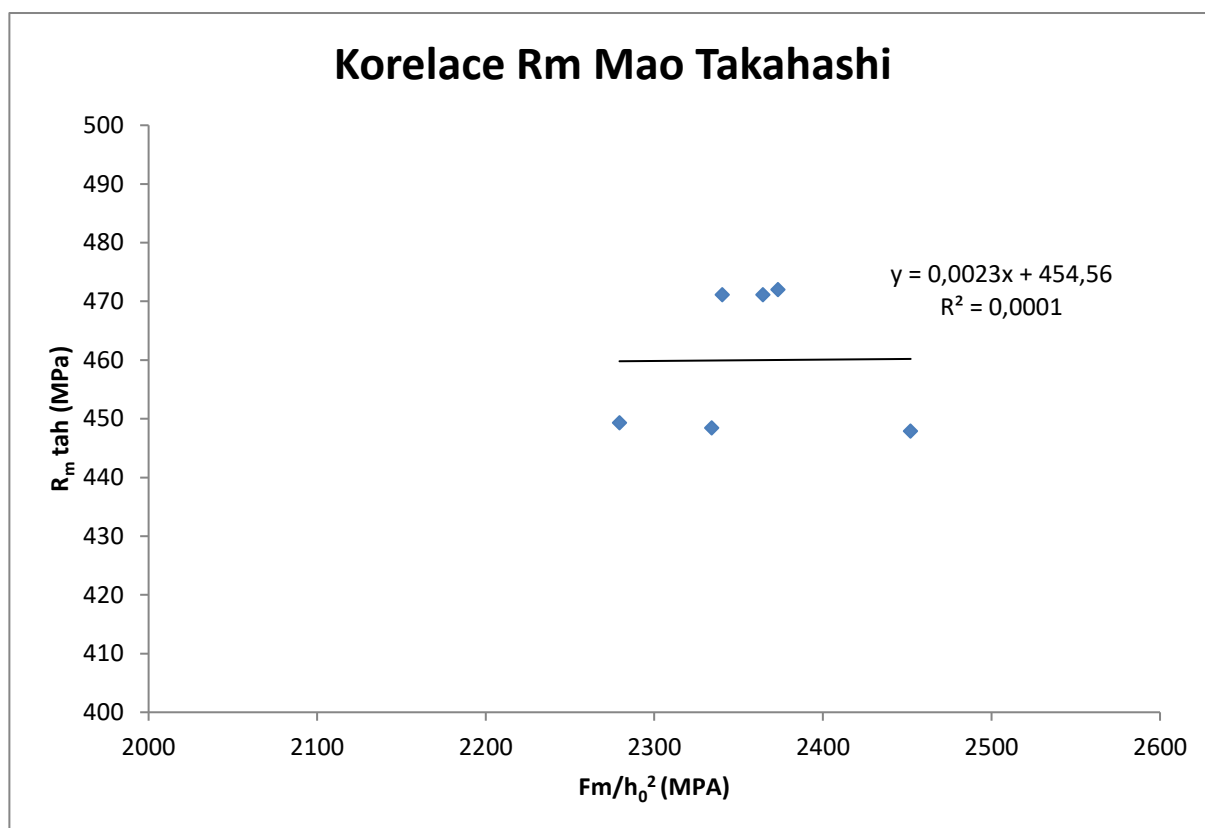
$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0 u_m} \quad (12)$$



Graf 2 korelace  $R_m$  dle CWA

Druhá metoda podle vztahu Mao a Takahashi, rovnice (14), která využívá druhý lineární parametr  $\alpha$ . Ukázal se nedostatek této metody, a to minimální hodnotu spolehlivosti. Tato metoda má velký problém s univerzálností výsledků, převážně právě kvůli druhému parametru. Avšak i přes minimální hodnotu spolehlivosti  $R^2=0,0001$  je vidět v Tabulce 10 malý rozdíl vypočtených hodnot od průměrné hodnoty získané z tahových zkoušek. To je způsobeno nebráním v potaz deformaci vzorku při tvoření trhliny a efektu tvorby „krčku“ při SPT, zatímco první korelační vztah toto v sobě zahrnuje, a proto jeho výsledky nejsou tak přesné. Výsledné hodnoty pak byly spočteny přes rovnici (14) s dosazením parametrů  $\beta=0,0023$  a  $\alpha=454,56$ .

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0^2} + \alpha \quad (14)$$



*Graf 3 Korelace Rm dle Mao a Takahashi*

*Tabulka 9 výsledné korelační parametry pro experiment*

Korelační parametry			
$\beta_{Re}$	$\beta_{Rm}$ CWA	$\beta_{Rm}$ MT	$\alpha_{Rm}$ MT
0,459	0,2985	0,0023	454,56

Průměrné hodnoty pro R<sub>m</sub> z tahu (Tabulka 4) byly rovny:

R<sub>m</sub>=460 MPa

R<sub>mL</sub>=472 MPa

R<sub>mT</sub>=448 MPa

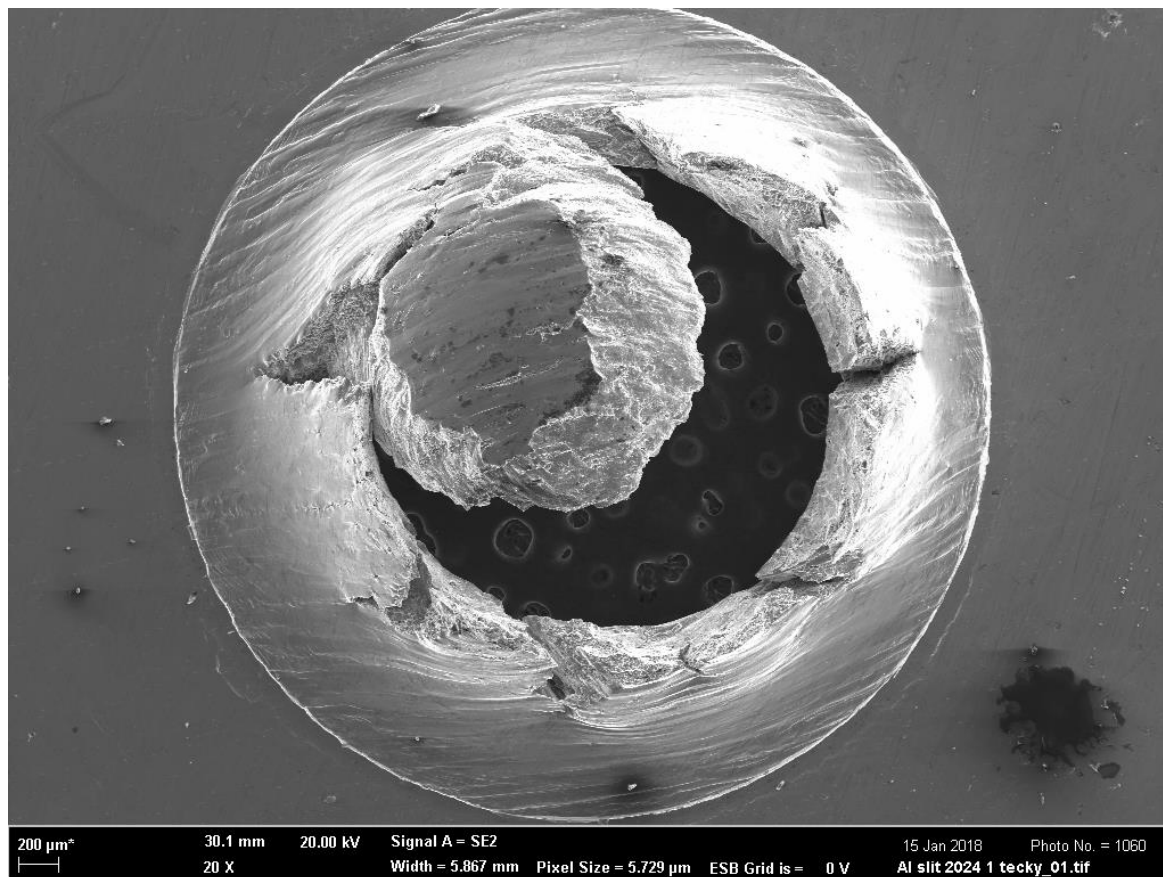
Tabulka 10 výsledné hodnoty  $R_m$  a jejich rozdíly s tahovou zkouškou

Vzorek	R <sub>m</sub> SPT CWA	R <sub>m</sub> SPT MT	R <sub>m</sub> CWA Rozdíl SPT a tah		R <sub>m</sub> MT Rozdíl SPT a tah	
	[MPa]	[MPa]	Celk.	Směr.	Celk.	Směr.
1	463,06	460,00	3,20	-8,86	0,14	-11,91
2	486,43	460,02	26,58	14,52	0,17	-11,89
3	471,49	459,94	11,64	-0,42	0,09	-11,97
4	488,84	459,80	28,99	16,93	-0,05	-12,11
5	437,55	460,20	-22,31	-34,37	0,35	-11,71
6	403,35	459,93	-56,50	-68,56	0,08	-11,98
7	481,40	460,15	21,55		0,30	
8	429,59	460,43	-30,26		0,58	
9	404,75	460,27	-55,10		0,42	

Jak je viditelné v Tabulce 10, zde již jsou hodnoty získané korelací SPT oproti tahu rozdílné, bylo by nutné provést více testů a zpřesnit tak korelační koeficient, aby nedocházelo k odchylkám hodnot vyšších než 50 MPa. Pro postup Mao Takahashi již rozdíly tak markantní nejsou, což je způsobeno charakterem rovnice, kde dva parametry korelace více zpřesní než jeden, avšak to prokazuje problém s univerzálností metody. Vzhledem k charakteru získání hodnot  $F_m$  je zde vyloučen efekt špatného vyhodnocení dat, protože se jedná o prosté získání maxima. Je tu možnost zkreslení precipitáty, jedná se o miniaturní vzorky a dobře umístěné precipitáty mohou blokovat svým zpevněním u jistých vzorků dislokace výrazněji než u ostatních, a tak dochází k velmi rozdílným hodnotám přepočtených  $R_m$  pomocí metody CWA. Taktéž vměstky mohou mít vliv na posun hodnoty  $F_m$  do rozdílných hodnot posuvu razníku, což zkresluje následné určení standardizovaného napětí pomocí podílu u metody CWA, na toto netrpí metoda Mao Takahashi, protože počítá pouze s původní tloušťkou vzorku.

### 9.3 Fraktografie

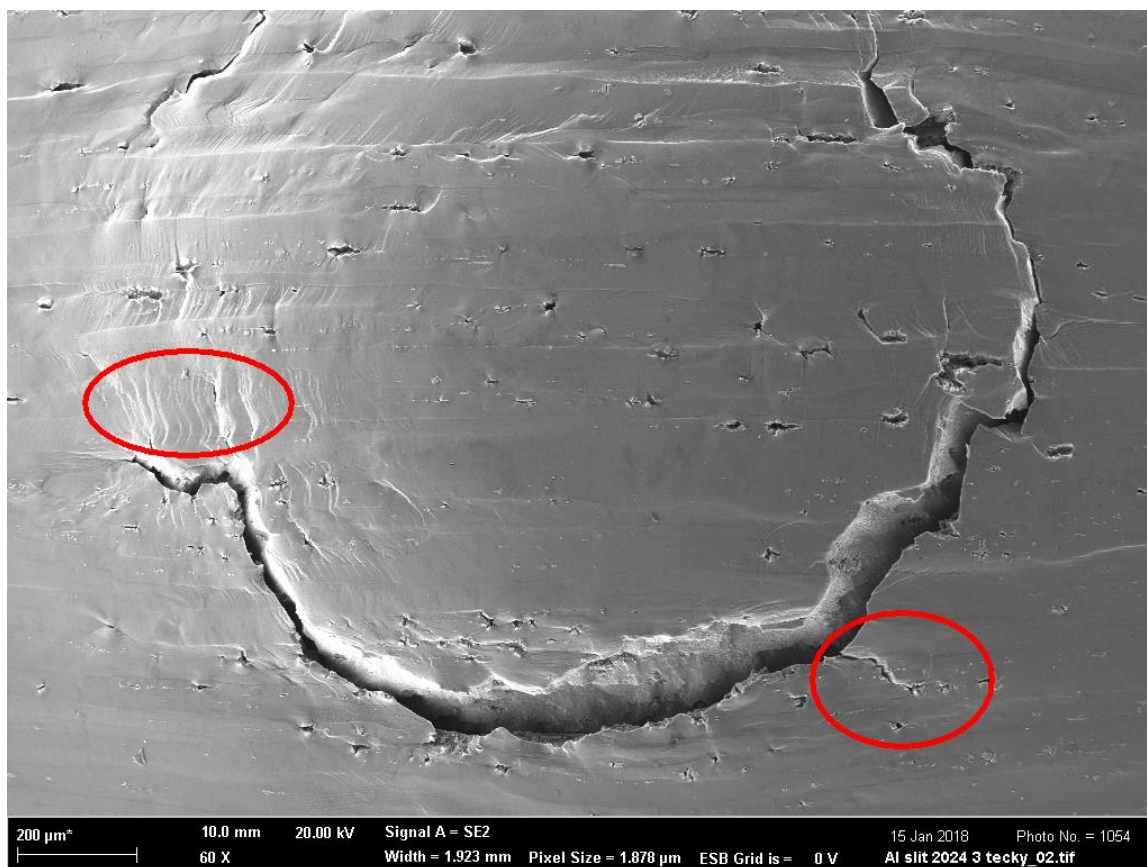
Pro vyhodnocení fraktografie se vzorky pozorovaly na analytickém komplexu Carl Zeiss FEG SEM v režimu sekundárních elektronů. Na Obr. 44 je patrné velké plastické přetvoření vzorku a množství sekundárních trhlin. Jsou zde viditelné projevy orientované struktury.



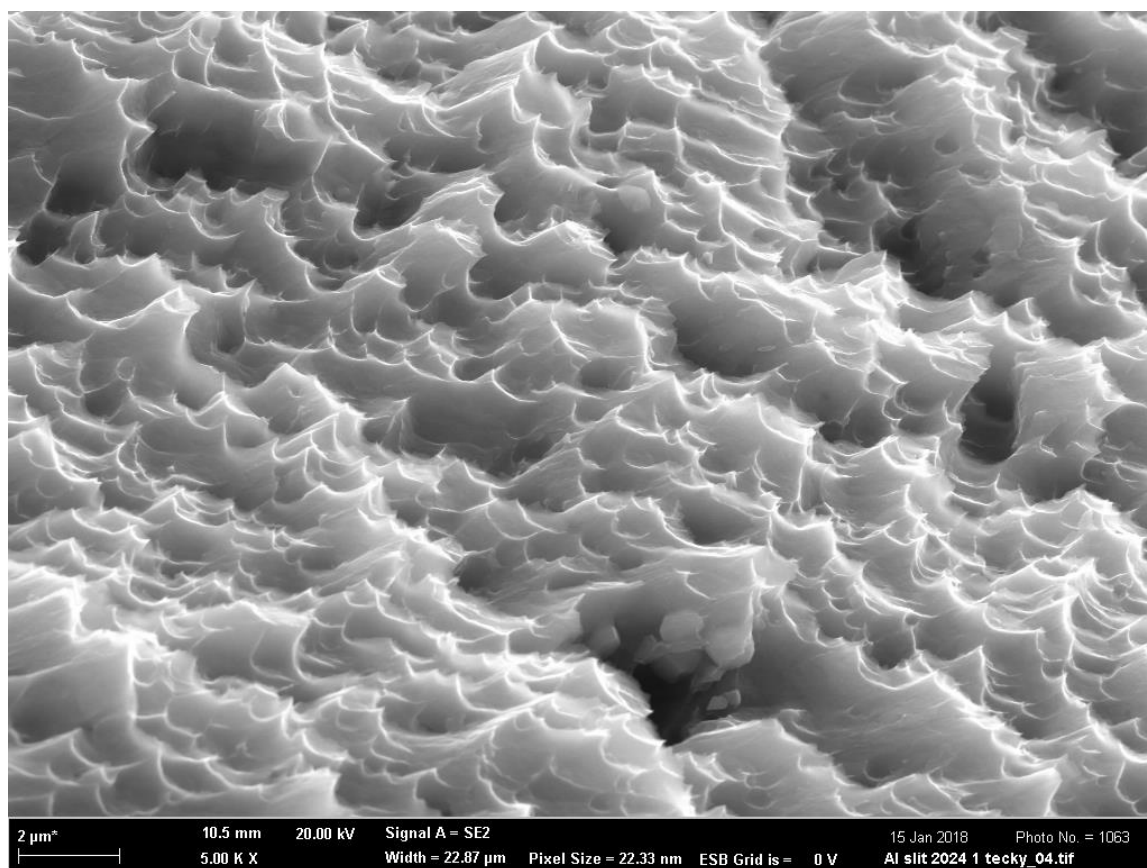
*Obr. 44 Lomová plocha vzorku 1*

Okolo lomu se dále ukazují sekundární trhliny směřující od lomové plochy a vytvářeného vrchlíku. U těchto sekundárních trhlin jsou pozorovatelná vznikající skluzová pásma. Tyto trhliny jsou dobře viditelné na Obr. 45, stejně tak i skluzová pásma, kde vlevo jsou v zakroužkované oblasti a kolem patrná skluzová pásma a vpravo je zakroužkována jedna ze sekundárních trhlin. Dále je pozorovatelné poškození vzorku v místech aglomerátu vměstků.

Na Obr. 46 jsou vidět velmi jemné jamky, o rozměrech menší než 2  $\mu\text{m}$  ze vzorku 3. Ukazuje to na transkrystalické tvárné porušení materiálu. Malé rozměry jamek jsou nejspíš způsobeny režimem napětí a projevujícím se membránovým napětím.



*Obr. 45 Sekundární trhliny a skluzová pásma*



*Obr. 46 Jamky na povrchu lomu*

## 10 Závěr

Tato práce se zabývá metodou Small punch test. V teoretické části byl popsán průběh metody a jevy projevující se při jejím průběhu. Dále jsou popsány možné rozdělení metody dle kritérií jako geometrie, zjišťovaného parametru a řízené veličiny. Experimentální část se zabývá korelací SPT k tahové zkoušce na slitině EN AW 2024 T351 a provedení metalografie a fraktografické analýzy. Mez kluzu byla korelována pomocí metody CWA a pro mez pevnosti byly provedeny dvě metody korelace, dle CWA s jedním parametrem a dle vztahu Mao Takahashi s dvěma parametry. Na základě metalografické analýzy, zjištění základních mechanických vlastností, odezvy při SPT a fraktografie lze vyvodit následující závěry:

- Metalografická analýza materiálu ukazuje na tvářenou slitinu s protáhlými zrny orientovanými ve směru tváření a s velkým podílem vměstků typu Al-Cu-Fe-Mn o velikosti až 50  $\mu\text{m}$ .
- Byla zjištěna relativně nízká míra anizotropie mechanických vlastností zjištěných zkouškou tahem ve směru L a T způsobenou pravděpodobně předchozím zpracováním křížovým válcováním.
- Na základě analýzy křivek SPT byl získán typický závislosti s možností stanovení parametrů  $F_e$  a  $F_m$ . Korelace s konvenční mezí kluzu  $R_{p0,2}$  ve směrech L a T ukázala odpovídající si hodnoty s dobrou hodnotou spolehlivosti.
- Korelace s konvenční mezí pevnosti  $R_m$  podle CWA dala méně přesné hodnoty ale s vyšší hodnotou spolehlivosti. Dvouparmetrová metoda Mao Takahashi dala přesnější hodnoty s minimálními rozdíly ale s velmi nízkou hodnotou spolehlivosti. Ukázaly se tím rozdíly v přesnosti a univerzálnosti.
- Fraktografickou analýzou bylo zjištěno velké tvárné porušení vzorků ve všech směrech odběru. Šíření porušení proběhlo interakcí s vměstkami a precipitáty, kde docházelo k větvení do sekundárních trhlin a tvorbě skluzových pásů. Na lomové ploše je velmi jemná jamková morfologie ukazující na mechanismus transkrystalického tvárného porušení.



## 11 Literatura

- [1] DRÁPALA, Jaromír. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs = Magnesium, its alloys and Mg - admixture binary systems. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [2] AVEDESIAN, M. M. (Michael M.) a Hugh BAKER. *ASM Specialty handbook. Magnesium and magnesium alloys*. Materials Park: ASM International, 1999, ix, 314 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 0-87170-657-1.
- [3] LUCAS, G.e. The development of small specimen mechanical test techniques. *Journal of Nuclear Materials* [online]. Elsevier B.V, 1983, **117**(C), 327-339 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/0022-3115(83)90041-7. ISSN 0022-3115. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(83\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0022-3115(83)90041-7)
- [4] MATOCHA, Karel. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.
- [5] LIU, Haiting, Yao SHEN, Shuang YANG, Pengfei ZHENG a Lei ZHANG. A comprehensive solution to miniaturized tensile testing: Specimen geometry optimization and extraction of constitutive behaviors using inverse FEM procedure. *Fusion Engineering and Design* [online]. Amsterdam: Elsevier Science, 2017, **121**, 188 [cit. 2019-05-08]. ISSN 09203796. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2059164813/>
- [6] Bruchhausen, M. Altstadt, E., Austin, T. Dymacek, P., Holmström, S., Jeffs, S., Lacalle, R., Lancaster, R., Matocha, K., Petzova, J. 2018. European standard on small punch testing of metallic materials. *Ubiquity Proceedings*, 1(S1): 11 DOI: <https://doi.org/10.5334/uproc.11>
- [7] CEN Workshop agreement CWA 15627:2006E, 2006. "Small Punch Test Method for Metallic Materials." Brussels, CEN
- [8] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. : il. ISBN 80-89041-88-4.
- [9] CAMPBELL, F.C. a F C CAMPBELL. *Lightweight Materials: Understanding the Basics*. Materials Park: A S M International, 2012. ISBN 9781615038497.
- [10] ZHONG, Jiru, Tong XU, Kaishu GUAN a Jerzy SZPUNAR. A procedure for predicting strength properties using small punch test and finite element simulation. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2019, **2019**(152), 228-235 [cit. 2019-05-08]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.006>. ISSN 00207403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.006>
- [11] MA, Y.w. a K.b. YOON. Assessment of tensile strength using small punch test for transversely isotropic aluminum 2024 alloy produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2010, **527**(16-17), 3630-3638 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2010.02.057. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.057>
- [12] ALTSTADT, E.;ge. Critical evaluation of the small punch test as a screening procedure for mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials* [online]. Elsevier, 2016, **472**, 186-195 [cit. 2019-02-06]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.07.029. ISSN 00223115. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.029>



- [13] CALAF CHICA, Jose, Pedro miguel BRAVO DÍEZ a Mónica PRECIADO CALZADA. Development of an improved prediction method for the yield strength of steel alloys in the Small Punch Test. *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2018, **148**, 153-166 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.03.064. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.064>
- [14] MORENO, M.f. Effects of thickness specimen on the evaluation of relationship between tensile properties and small punch testing parameters in metallic materials. *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2018, **157**, 512-522 [cit. 2019-02-06]. DOI: j.matdes.2018.07.065. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.065>
- [15] VANKO, Branislav, Ladislav STANČEK a Roman MORAVČÍK. EN AW-2024 Wrought Aluminum Alloy Processed by Casting with Crystallization under Pressure. *Journal of Mechanical Engineering* [online]. Sciendo, 2017, **67**(2), 109-116 [cit. 2019-02-06]. DOI: 10.1515/scjme-2017-0024. Dostupné z: <https://doaj.org/article/fcfc180bd28548f9b622c68269389a0f>
- [16] GARCÍA, T.e., C. RODRÍGUEZ, F.j. BELZUNCE a C. SUÁREZ. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. Elsevier B.V., 2014, **582**, 708-717 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.009. ISSN 0925-8388. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.009>
- [17] PRIEL, E., B. MITTELMAN, S. HAROUSH, A. TURGEMAN, R. SHNECK a Y. GELBSTEIN. Estimation of yield and ultimate stress using the small punch test method applied to non-standard specimens: A computational study validated by experiments. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. Elsevier, 2018, **135**, 484-498 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.11.040. ISSN 0020-7403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.040>
- [18] SIEGL, Jan, Petr HAUŠILD, Adam JANČA a Radim KOPŘIVA. Fractographic Aspects of Small Punch Test Results. *Procedia Materials Science* [online]. 2014, **2014**(3), 912-917 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.148. ISSN 22118128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.148>
- [19] NOII, Nima a Iman AGHAYAN. Characterization of elastic-plastic coated material properties by indentation techniques using optimisation algorithms and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019, **152**, 465-480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.010>. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740318318186>
- [20] CHICA, José Calaf, Pedro Miguel BRAVO DÍEZ a Mónica PRECIADO CALZADA. Improved correlation for elastic modulus prediction of metallic materials in the Small Punch Test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017, **134**, 112-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.006>. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740317317976>
- [21] KUMAR, Kundan, K. MADHUSOODANAN a R.N. SINGH. Miniature test techniques for life management of operating equipment. *Nuclear Engineering and Design*. 2017, **323**, 345-358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.007>. ISSN 0029-5493. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549317301127>

- [22] ALTSTADT, E., M. HOUSKA, I. SIMONOVSKI, M. BRUCHHAUSEN, S. HOLMSTRÖM a R. LACALLE. On the estimation of ultimate tensile stress from small punch testing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, **136**, 85-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.016>. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740317331156>
- [23] BRUCHHAUSEN, M., S. HOLMSTRÖM, I. SIMONOVSKI, T. AUSTIN, J.-M. LAPETITE, S. RIPPLINGER a F. DE HAAN. Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT: Tensile properties and DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, **86**, 2-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.012>. ISSN 0167-8442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216301677>
- [24] JANČA, Adam, Jan SIEGL a Petr HAUŠILD. Small punch test evaluation methods for material characterisation. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, **481**, 201-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.09.015>. ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311516307644>
- [25] HURST, Roger C., Robert J. LANCASTER, Spencer P. JEFFS a Martin R. BACHE. The contribution of small punch testing towards the development of materials for aero-engine applications. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, **86**, 69-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.07.013>. ISSN 0167-8442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216301641>
- [26] MORENO, M.F., G. BERTOLINO a A. YAWNY. The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test. *Materials & Design*. 2016, **95**, 623-631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.148>. ISSN 0264-1275. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516301460>
- [27] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K. MADHUSOODANAN, R.N. SINGH, J.K. CHAKRAVARTTY, B.K. DUTTA a R.K. SINHA. Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties. *Procedia Engineering*. 2014, **86**, 899-909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.112>. ISSN 1877-7058. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814020712>
- [28] YANG, S.S., X. LING, Y. QIAN a R.B. MA. Yield Strength Analysis by Small Punch Test Using Inverse Finite Element Method. *Procedia Engineering*. 2015, **130**, 1039-1045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.259>. ISSN 1877-7058. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815041430>
- [29] LANCASTER, R.J., S.P. JEFFS, H.W. ILLSLEY, C. ARGYRAKIS, R.C. HURST a G.J. BAXTER. Development of a novel methodology to study fatigue properties using the small punch test. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, **748**, 21-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.074>. ISSN 0921-5093. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319300917>
- [30] NAKATA, Toshiya, Shin-ichi KOMAZAKI, Yutaka KOHNO a Hiroyasu TANIGAWA. Development of a small punch testing method to evaluate the creep property of high Cr ferritic steel: Part II – Stress analysis of small punch test specimen by finite element method: Part II – Stress analysis of small punch test specimen by finite element method. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, **666**, 80-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.102>. ISSN 0921-5093. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316303161>

- [31] LI, Kaishang, Jian PENG a Changyu ZHOU. Construction of whole stress-strain curve by small punch test and inverse finite element. *Results in Physics* [online]. Elsevier, 2018, **11**, 440-448 [cit. 2019-05-09]. ISSN 2211-3797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.255>. ISSN 2211-3797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.255>
- [32] ZHUANG, F.-K. a S.-T. TU. Sensitivity Analysis of Ball Punch Geometry for Small Punch Testing. *Procedia Engineering*. 2015, **130**, 1019-1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.255>. ISSN 1877-7058. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815041399>
- [33] GUDURU, R.K., K.A. DARLING, R. KISHORE, R.O. SCATTERGOOD, C.C. KOCH a K.L. MURTY. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, **395**(1), 307-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.12.048>. ISSN 0921-5093. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305000201>
- [34] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K. MADHUSOODANAN, R.N. SINGH, J.K. CHAKRAVARTTY, R.S. SHRIWASTAW, B.K. DUTTA a R.K. SINHA. Evaluation of ultimate tensile strength using Miniature Disk Bend Test. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, **461**, 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.02.029>. ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311515001245>
- [35] ESFANDYARPOUR, Mohammad Javad, Reza ALIZADEH a Reza MAHMUDI. Applicability of shear punch testing to the evaluation of hot tensile deformation parameters and constitutive analyses. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, **8**(1), 996-1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.02.014>. ISSN 2238-7854. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785417306890>
- [36] BŘEZINA, Martin a Ludovít KUPČA. Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkovaných zariadení pri hodnotení vlastností materiálov. *Chemické Listy* [online]. 2011, **105**(14), s167-s170 [cit. 2019-05-09]. ISSN 00092770. Dostupné z: [https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN\\_scopus2-s2.0-79952591119](https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_scopus2-s2.0-79952591119)
- [37] SIMONOVSKI, Igor, Stefan HOLMSTRÖM a Matthias BRUCHHAUSEN. Small punch tensile testing of curved specimens: Finite element analysis and experiment: Finite element analysis and experiment. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017, **120**, 204-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.029>. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316309353>
- [38] RODRÍGUEZ, C., M. FERNÁNDEZ, J.G. CABEZAS, T.E. GARCÍA a F.J. BELZUNCE. The use of the small punch test to solve practical engineering problems. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, **86**, 109-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.021>. ISSN 0167-8442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216301926>
- [39] CONTRERAS, M. A., C. RODRÍGUEZ, F. J. BELZUNCE a C. BETEGÓN. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Wiley-Blackwell, 2008, **31**(9), 727-737. ISSN 8756758X. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=34850096&lang=c&site=ehost-live>

- [40] MARTÍNEZ-PAÑEDA, E., I.I. CUESTA, I. PEÑUELAS, A. DÍAZ a J.M. ALEGRE. Damage modeling in Small Punch Test specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, **86**, 51-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.002>. ISSN 0167-8442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216301616>
- [41] MAO, Xinyuan a Hideaki TAKAHASHI. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (ø 3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials*. 1987, **150**(1), 42-52. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4). ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022311587900924>
- [42] RASCHE, Stefan a Meinhard KUNA. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2015, **125**, 23-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.09.001>. ISSN 0308-0161. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016114000982>
- [43] BRAVO DÍEZ, Pedro Miguel, Monica PRECIADO CALZADA, David CÁRDENAS GONZALO a José CALAF CHICA. Change of mechanical properties of AM60B alloy with heat treatments and its correlation with small punch tests. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, **86**, 101-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.014>. ISSN 0167-8442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844216301707>
- [44] KONOPIK, P, P FARAHNAK, M RUND, J DŽUGAN a S RZEPA. Applicability of miniature tensile test in the automotive sector. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, **461**, 012043. DOI: 10.1088/1757-899x/461/1/012043. ISSN 1757-899X. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012043>

## 12 Seznam použitých zkratk a symbolů

### Zkratky

TOO	Tepelně ovlivněná oblast
ASTM	American Society for Testing and Materials
SPT	Small punch test
CEN	Evropský výbor pro normalizaci, Comité Européen de Normalisation
SSam	Small Sample
CBN	Kubický nitrid boru
FATT	Fracture appearance transition temperature
DBTT	Ductile to brittle transition temperature
MKP	Metoda konečných prvků
GP	Guinier-Preston
Al <sub>2</sub> CuMg	Vytvrzující fáze
Al <sub>2</sub> Cu	Vytvrzující fáze

### Symbole

$\sigma_{ij}$	[MPa] hodnoty napětí tenzoru napětí
E	[MPa] Modul pružnosti v tahu
$\mu$	[-] Poissonova konstanta
$\varepsilon$	[-] Deformace elastická
$\delta_{ij}$	[-] Kroneckerovo delta
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	[-] hodnoty deformace matice přetvoření
$\varepsilon^{el}$	[-] Elastická deformace
$\varepsilon^{pl}$	[-] Plastická deformace
Re	[MPa] Mez kluzu
Rm	[MPa] Mez pevnosti
F	[N] působící síla
R	[mm] poloměr razníku/kuličky
h	[mm] počáteční tloušťka vzorku
$\alpha$	[°] úhel styku kuličky s vzorkem
f <sub>A</sub>	[N] hodnota síly v bodě A
u <sub>A</sub>	[mm] hodnota posunutí razníku v bodě A
f <sub>B</sub>	[N] hodnota síly v bodě B
u <sub>B</sub>	[mm] hodnota posunutí razníku v bodě B
u	[mm] hodnota posunutí, pro kterou hledáme funkční hodnotu
v <sub>A</sub>	[mm] hodnota posunutí razníku v bodě A
v <sub>0</sub>	[mm] hodnota posunutí po překonání vlivu tvrdosti materiálu
v	[mm] hodnota posunutí razníku, pro kterou hledáme funkční hodnotu
Fe	[N] síla na přechodu plastické a elastické oblasti
h <sub>0</sub>	[mm] původní tloušťka vzorku
F <sub>m</sub>	[N] maximální dosažená síla
u <sub>m</sub>	[mm] prodloužení při dosažení maximální síly
E <sub>US</sub>	[J] nejvyšší dosažená zkorigovaná energie
E <sub>LS</sub>	[J] nejnižší dosažená zkorigovaná energie
C	[-] statistický parametr
$\varepsilon_{US}$	[-] nejvyšší dosažená deformace
$\varepsilon_{LS}$	[-] nejnižší dosažená deformace
C'	[-] dosazovací parametr
T <sub>tCh</sub>	[°C] tranzitní teplota zjištěná na Charpyho kladivu

$\gamma$	[-]	materiálová konstanta
$r$	[mm]	poloměr zakončení puncheru
$h$	[mm]	tloušťka vzorku v místě doteku
$r$	[mm]	poloměr puncheru
$D$	[mm]	průměr otvoru v matici
$k_{SP}$	[-]	korelační parametr obsahující vliv jak materiálu tak teploty zkoušení
$u_{min}$	[mm]	minimální průhyb vzorku

## 13 Seznam obrázků

Obr. 1	Schéma SPT	[6]
Obr. 2	Typické průběhy, vlevo creep test, vpravo SPT	[6]
Obr. 3	Schéma Ball punch test	[4]
Obr. 4	Schéma pro výpočet napětí při kuličkovém testu, převzato a upraveno	[4]
Obr. 5	Schéma oblastí při ball punch testu	[4]
Obr. 6	Schéma Shear punch testu	[3]
Obr. 7	Porovnání Shear a Ball testu	[4]
Obr. 8	Schéma průběhu shear punch testu	[4]
Obr. 9	Schéma Disc bend test	[4]
Obr. 10	Odběrová hlava	[36]
Obr. 11	Schéma mechanického odbrušování	[36]
Obr. 12	Materiál odebraný elektrojiskrovou metodou	[36]
Obr. 13	Vzorky pro fraktografii	[6]
Obr. 14	Model pro metodu konečných prvků	[43]
Obr. 15	Aproximace Fe dle CWA	[7]
Obr. 16	Určení Fe dle rozpracovaného návrhu normy	[6]
Obr. 17	Závislost přesnosti korelace Re na tloušťce vzorku	[4]
Obr. 18	Měření tloušťky po dokončení zkoušky	[4]
Obr. 19	Pop-in na záznamu	[6]
Obr. 20	Ukázka vyhodnocených dat pro ocel P92 (X10CrWMoVNB 9-2)	[6]
Obr. 21	GTN model a porovnání simulace šíření trhliny s provedenou zkouškou	[39]
Obr. 22	Schéma pro výpočty při creep testu	[7]
Obr. 23	Rozptyl dat pro nový postup vyhodnocování creepových vlastností	[6]
Obr. 24	Zkušební těleso dogbone	[5]
Obr. 25	Zkušební těleso pro tah, převzato a upraveno	[44]
Obr. 26	Binární diagram Al-Cu	[8]
Obr. 27	Snímek mikrostruktury v L směru	
Obr. 28	Snímek mikrostruktury v L směru	
Obr. 29	Snímek mikrostruktury v T směru	
Obr. 30	Snímek mikrostruktury v T směru	
Obr. 31	Porovnání průběhu tahových zkoušek v T a L směru	
Obr. 32	Rozložený pohled 3D modelu	
Obr. 33	Řez 3D modelem sestavy	
Obr. 34	Aproximace Fe dle CWA pro vzorek 1 s chybovou funkcí	
Obr. 35	Aproximace pro vzorek 1	
Obr. 36	Aproximace pro vzorek 2	
Obr. 37	Aproximace pro vzorek 3	
Obr. 38	Aproximace pro vzorek 4	
Obr. 39	Aproximace pro vzorek 5	
Obr. 40	Aproximace pro vzorek 6	
Obr. 41	Aproximace pro vzorek 7	
Obr. 42	Aproximace pro vzorek 8	
Obr. 43	Aproximace pro vzorek 9	
Obr. 44	Lomová plocha vzorku 1	
Obr. 45	Sekundární trhliny a skluzová pásma	
Obr. 46	Jamky na povrchu lomu	

## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1	korelační parametry pro alternativní výpočtový vztah, převzato z [6]
Tabulka 2	chemické složení
Tabulka 3	základní mechanické vlastnosti
Tabulka 4	data z tahové zkoušky
Tabulka 5	rozměry vzorků pro SPT
Tabulka 6	ukázka optimalizační tabulky pro vzorek 1
Tabulka 7	vstupní data pro korelace
Tabulka 8	získané hodnoty a jejich rozdíly oproti tahu
Tabulka 9	výsledné korelační parametry pro experiment
Tabulka 10	výsledné hodnoty $R_m$ a jejich rozdíly stahovou zkouškou

## 15 Seznam grafů

Graf 1	korelace $R_e$
Graf 2	korelace $R_m$ dle CWA
Graf 3	korelace $R_m$ dle Mao a Takahashi

## 16 Seznam příloh

Příloha 1	Výkres sestavy přípravku SPT
Příloha 2	Výkres horní části přípravku
Příloha 3	Výkres dolní části přípravku
Příloha 4	Výkres matice pro vzorek
Příloha 5	Výkres razníku